

Jürgen Krimmling und Martin Lehnert (Hg.)

Aspekte der Verkehrstelematik – ausgewählte Veröffentlichungen 2012

Verkehrstelematik | 2

Hg. von Jürgen Krimmling und Martin Lehnert

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Verkehrstelematik
Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling
Tel.: +49 351 463-36784
E-Mail: Juergen.Krimmling@tu-dresden.de
<http://tu-dresden.de/vlp>

Jürgen Krimmling und Martin Lehnert (Hg.)
**Aspekte der Verkehrstelematik –
ausgewählte Veröffentlichungen 2012**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at
<http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-944331-18-8

© 2013 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Gesetzt vom Autor.
Printed in Germany.

Vorwort

Die Professur Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung an der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden blickt auf ein sehr erfolgreiches Jahr 2012 zurück. Dies zeigt sich zum Einen im Bereich der universitären Lehre mit einem umfangreichen Angebot an Lehrveranstaltungen und jeweils sechs erfolgreich abgeschlossenen Diplom- und Studienarbeiten. Auch fünf Promotionen wurden als Gutachter, Prüfer oder Beisitzer begleitet. Zum Anderen wurden im Bereich der Forschung vielfältige Projekte durch die Mitarbeiter bearbeitet und die Ergebnisse im nationalen und internationalen Umfeld präsentiert.

Einen Höhepunkt in der öffentlichen Präsentation stellte zweifelsohne die Teilnahme am 19. ITS World Congress im Oktober 2012 in Wien dar. Mit sieben Fachbeiträgen und der Teilnahme an der Fachausstellung stellten die Mitarbeiter der Professur die am stärksten vertretene deutsche Hochschule auf dem Kongress dar. Diese Beiträge und weitere Veröffentlichungen der Professur finden Sie nun im vorliegenden Band.

Neben diesem internationalen Austausch boten die 23. Verkehrswissenschaftlichen Tage Gelegenheit, Forschungsergebnisse auch in deutscher Sprache vorzustellen und zu diskutieren. Diese seit 1954 stattfindende Veranstaltung schaffte mit dem Themenschwerpunkt Elektromobilität eine Verbindung von Tradition und Moderne, die sich auch in den Projekten und Forschungsgebieten der Professur widerspiegelt. Dabei ist besonders herauszuheben, dass in einer großen Spannbreite alle Landverkehrssysteme, angefangen bei der Vollbahn über die Verkehrsmittel des ÖPNV bis hin zum Individualverkehr auf der Straße mit ihren verkehrstelematischen Einrichtungen und Eigenheiten Berücksichtigung finden. Neben dem Erarbeiten unentbehrlicher Grundlagen werden in Zusammenarbeit mit internationalen, nationalen und lokalen Forschungseinrichtungen und Unternehmen innovative Ansätze erprobt und wie im Falle der Fahrerassistenzsysteme schienengebundener Verkehrssysteme zum Einsatz gebracht.

Ich freue mich besonders, dass mit dem vorliegenden Band der Reihe Verkehrstelematik nun erstmals ein Einblick in die vielfältigen Forschungsthemen der Professur auch der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden kann. Dafür wurden einige ausgewählte, im Jahr 2012 veröffentlichte Beiträge der Mitarbeiter der Professur Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung zusammengestellt. Im Sinne eines regen und fruchtbaren fachlichen Austauschs möchte ich gern darauf hinweisen, dass die Autoren auch über die abgedruckten Beiträge hinaus für Forschungsfragen gern zur Verfügung stehen.

Bevor Sie die Lektüre des vorliegenden zweiten Bandes der Reihe Verkehrstelematik fortsetzen, möchte ich es nicht versäumen, mich für die hervorragende technische und gestalterische Aufbereitung der Manuskripte bei meinen Mitarbeitern Frau Birgit Jaekel und Herrn Dr. Martin Lehnert zu bedanken.

Dresden im Juni 2013

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

Inhaltsübersicht

Cooperative Traffic Signals for Energy Efficient Driving in Tramway Systems <i>(Christian Gassel, Tobias Matschek, Jürgen Krimmling)</i>	1
Das Verkehrsmanagementsystem der Region Dresden <i>(Gunter Thiele)</i>	11
Determination of Turning Rates Using Floating Car Data <i>(Matthias Körner)</i>	17
Direct Use of Taxi-FCD to Generate Road Traffic Messages <i>(Matthias Körner)</i>	21
Energieoptimale Echtzeit-Fahrzeitenregelung im Schienennahverkehr <i>(Anne Binder, Thomas Albrecht)</i>	25
Experiences with Video-Based Parking Space Surveillance <i>(Klaus-Peter Döge, Jürgen Krimmling)</i>	37
Microscopic Real-Time Simulation of Dresden <i>(Robert Oertel, Mario Krumnow, Jürgen Krimmling, Peter Wagner)</i>	43
Mobile Services of Social Networks and their Potential for Traffic Management <i>(Andreas Kretschmer, Sven Fröhlich, Christian Gassel)</i>	51
Pilotierung eines Assistenzsystems zur kraftstoffsparenden Fahrweise im SPNV <i>(Thomas Albrecht, Matthias Pathe)</i>	61
Predictive Energy-Efficient Running Time Control for Metro Lines <i>(Anne Binder, Thomas Albrecht)</i>	71
Senkung des Energiebedarfs bei Straßenbahnen durch Haltvermeidung <i>(Martin Lehnert, Christian Gassel, Tobias Matschek, Jürgen Krimmling)</i>	91
The Traffic Management System VAMOS – from Research to Regular Operation <i>(Andreas Kretschmer, Jürgen Krimmling)</i>	109
Mitarbeiter der Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung	121

Cooperative Traffic Signals for Energy Efficient Driving in Tramway Systems

Christian Gassel, Tobias Matschek, Jürgen Krimmling

Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22–26, 2012, paper ID EU-00422.

Abstract

Traffic lights have significant impact on traffic conditions at all, but also on energy consumption of approaching vehicles. The Technische Universität Dresden is investigating several paths to reduce unnecessary stops at traffic lights. Finally, three energy saving strategies have been examined in depth: (I) Energy savings by traffic signal control, (II) by an onboard Driver Advisory System (DAS) and (III) by considering energy consumption in the cost function of traffic signal control and using DAS as well. As a result of research, a system was developed where cooperative traffic lights fulfil multi-model needs. Furthermore, the first DAS for energy efficient tramway control was designed, named COSEL. COSEL receives data about green phases from cooperative traffic lights and is already used in tramway operation.

Keywords: Energy Efficiency, Tramway, Cooperative Traffic Lights, Traffic Management, ITCS, Multi-Criteria Optimisation

1 Background and objectives

Since automotive industry has been researching intensively on low-emission car mobility for some years, public transport has to compete with private transport on ecological aspects. In addition, energy prices tend to become more relevant for public transport operators.

At present industry and scientific institutions are researching intensively on energy storage systems for public transport, which increase the possibilities of recovering the kinetic energy of vehicles under regenerative braking. In contrast, this paper concentrates on operational measures to reduce tractive energy consumption already in advance.

In case of not having unlimited preemption, tractive energy consumption of tramways is influenced by traffic lights. Several strategies have been examined, which reduce unnecessary stops at traffic lights causing additional tractive energy consumption.

2 Optimisation strategies

This paper describes three approaches to reduce energy consumption of tramways in combination with traffic lights.

2.1 Approach I: Energy savings by traffic light control

Energy consumption can be reduced by fitting the green phase to the arrival time of the approaching vehicle. The driver passes the traffic signal without being informed about the duration of green phases. In this case, unlimited preemption for public transport represents the maximum reduction of unnecessary stops.

The Technische Universität Dresden developed a multi-criteria signal control (MCSC) system to decide about public transport preemption at traffic lights. Tramway preemptions are determined under consideration of operational issues (punctuality, headway regularity, connection services and optimal order of tramway vehicles at intersections, where the order can be influenced) and private transport issues (traffic flow). Therefore MCSC evaluates various green phases with configurable multi-criteria cost functions and chooses optimum green phases with minimum multimodal costs [Mat11, Kri10]. Finally, the stopping rate depends on the criteria mentioned above and the parameter settings used.

However, the amount of energy savings by fewer stops is affected by several additional parameters (vehicles attributes, track infrastructure, energy supply management and operational restrictions). With respect to operational restrictions maximum speed limits have intensive impact on energy savings in combination with stopping rates. In case of low speed limits (e.g. due to switches close to traffic lights) an additional stop has less impact on energy consumption, because of short-term acceleration activities to reach the speed limit again.

2.2 Approach II: Energy savings by DAS onboard

Driver advisory systems supporting energy efficient driving have already been developed for European railways and metro systems [Rai09]. These systems calculate optimal trajectories in real-time. The algorithms used differ in single-train and multi-train optimisation, single-section and multi-section optimisation as well as heuristic and numerical optimisation approaches [How95, Liu03]. In average DAS in railways can provide energy savings of 5 % – 10 %.

For tramways DAS for energy efficient driving never have been used in practice. The reasons are linked with the specific transport mode characteristics, e.g. vehicle actuated signal control with green phases, which are difficult to predict.

For the first time a DAS has been designed for tramways, named COSEL (Computer Optimised Speed Control for Energy-efficient Light-rails), supporting drivers to avoid unnecessary stops at traffic lights. Furthermore, additional stops in front of commercial stops, which are occupied by other public transport vehicles, are avoided as well. Therefore MCSC receives status data of cooperative traffic lights as well as operational data from the ITCS (Intermodal Transport Control System). In addition, green phases at traffic lights are chosen (similar to *approach I*) by MCSC and driving trajectories of other vehicles are predicted to estimate occupation times at stops. These spatial and temporal data about expected conflicts are sent to the DAS onboard.

Finally, COSEL calculates the optimum driving trajectory ensuring smooth driving without unnecessary operational stops. The algorithms used are explained later in section “Driver Advisory System COSEL”.

2.3 Approach III: Energy savings by the combination of multi-criteria signal control and DAS

The cost function of MCSC is extended by energy/fuel consumption of public and private transport vehicles. The green phase with minimum costs will be calculated by MCSC and transmitted to the DAS onboard. Algorithms used by DAS equal to approach II.

3 Data communication

In order to avoid an isolated solution data communication bases on several standardised interfaces being used in several European countries.

Approach I only requires unidirectional data transfer from the vehicle to MCSC. No data are sent to the vehicle. Since VDV (Association of German Transport Companies) defines various data interfaces/standards which are used in public transport systems all over Europe, MCSC uses a set of VDV interfaces. Both, operational issues of public transport considered in multi-criteria cost function and automatic vehicle location data, are derived by data being contained in *VDV 45x-* as well as in *VDV R09.16*. Communication between MCSC and the local signal control unit bases on OCIT (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems). Using OCIT makes the approach usable for a wide range of signal control units (e.g. produced by Siemens, Swarco, etc.).

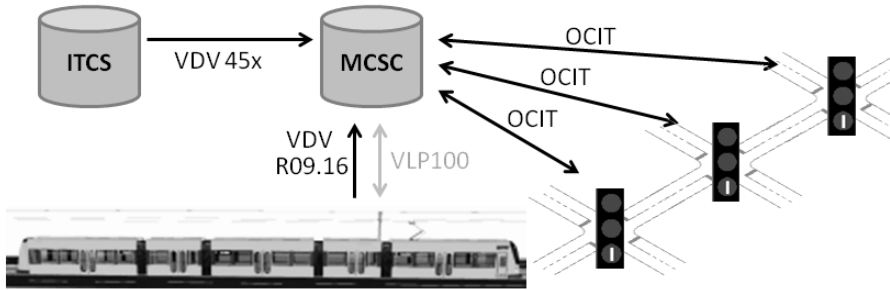


Figure 1: Fundamental interfaces used in approach I (black arrows) and approach II/III (black and grey arrows).

The approaches II and III additionally involve data transfer to public transport vehicles. Since data required are not covered by an existing standard interface the specific interface *VLP100* (TU Dresden development) is used. With lessons learned from applicability of *VLP100* further standardisation actions are planned.

4 Driver advisory system COSEL

The driver advisory system COSEL was developed by the Technische Universität Dresden. The algorithms used base on single-section optimisation (between two consecutive stops) applying the maximum principle of Pontryagin [Liu03]. Various relevant parameters are considered in optimisation like vehicle attributes (e.g. driving dynamics) and track parameters (e.g. gradients).

The running time reserves being used for energy-efficient driving are derived from optimal target times at conflict areas. Because transport capacity always plays a significant role at conflict points, target times firstly result from capacity consideration. In general, traffic lights should be passed as early as possible and vehicles should arrive at stops as soon as the stop is not occupied anymore. In addition, these rules also fulfil the operational requirement of reduced journey times. However, due to safety reasons, the optimum target point at traffic lights is set some seconds later than the beginning of the green phase (see figure 2). Therefore, the driver approaching traffic lights has been aware of a green signal aspect for some seconds and is not concerned of approaching at red signals. The optimum target time is shifted to a later point of time, not until the driver is unable to approach at the conflict area in time, even with time-optimal driving.

Especially in city centres where several public transport lines are being operated and public transport interferes with motorised individual transport running time reserves strongly vary (0 s – 80 s). Due to short distances between two consecutive stops (about 300 m – 600 m) and operational constraints (minimum speed

constraints and a very few changes of driving advice) the usage of high running time reserves for energy efficient driving is not possible with the ordinary pool of regimes (acceleration with maximum permitted acceleration, cruising at maximum speed, coasting and braking with maximum permitted deceleration).

Therefore, two additional regimes are introduced:

Cruising below maximum speed.

High running time reserves could be used to avoid unnecessary stops with a minimum number of additional advice. In contrast, the alternative driving strategy, called “sawteeth” (a repeating sequence of acceleration and coasting) requires several additional switching points respectively advice. As mentioned before, the increased number of advice is not conformable with the given restriction in tramway operation.

However, cruising below maximum speed is restricted by minimum speed constraints. If running times are relatively high (for instance caused by a long duration of red phases) cruising below minimum speed constraints will be required but will not be permitted.

Therefore the second additional regime is introduced:

Waiting at a commercial stop.

The driver waits longer at the stop before entering the section with expected conflicts to avoid approaching traffic lights with cruising speed below minimum speed. That waiting time can be used effectively for passenger interchange. In order to use that regime as an element of energy efficient driving, conflicts have to be predicted on a section, before the vehicle enters that section. If red phases and other conflicts could not be predicted as long as the tramway waits at the previous stop, energy efficient driving strategies would still be possible but a stop at the conflict would be unavoidable in some cases (e.g. high running time reserves are given but minimum speed restrictions prohibit a slow approaching speed).

Figure 2 illustrates several optimum trajectories depending on departure time at the previous stop. In the case shown, the driver has to wait 22 seconds at the commercial stop until a valid trajectory is given by DAS, which fulfils the minimum speed restriction and allows an arrival at the traffic light exactly at the optimal target time (dotted trajectory). If the driver waits longer because of passenger interchange, the running time reserves will decline, respectively approaching speed will increase. In case of not existing running time reserves, the optimal target time at the traffic

light is shifted to a later point of time as long as the target time represents a part of the green phase (departure between second 45 to second 62). Thereby the driver is able to avoid a stop at the traffic light with time-optimal driving (full line trajectories).

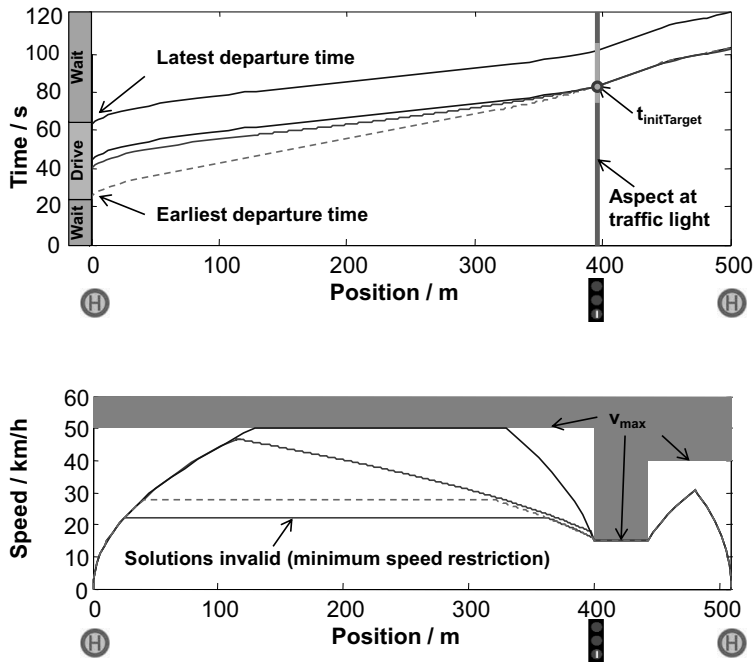


Figure 2: Optimum driving trajectories with respect to tramway specific restrictions.

5 Implementation and experience of regular operation

Since July 2011 MCSC has been running in practical operation in Dresden, Germany. In order to use traffic data for multi-criteria optimisation MCSC receives current data from two central management systems. Firstly, the Dresden traffic management system VAMOS supplies information about road traffic conditions [Kre12]. Secondly, the Dresden ITCS being used by the Dresden Transport Operator (Dresdner Verkehrsbetriebe AG – DVB AG) provides specific operational data of public transport.

MCSC influences traffic control of two intersections (Nürnberger Platz and Reichenbachstraße/Fritz-Löffler-Str.), where two tramway lines (3, 8) are operating. Because of conflicts with the major road legs (average daily traffic – 28,000 vehicles, diversion route of the motorway nearby, coordinated green phases with intersections

in neighbourhood), unlimited preemption for both tramway lines cannot be applied at Nürnberger Platz. MCSC is evaluating road traffic conditions of the major road as well as operational aspects of the public transport.

Figure 3 demonstrates the influence of schedule delay on tramway preemption at the traffic signal Nürnberger Platz. MCSC tends to result in higher priority for trams being late, than trams which are on time or trams which are operating even too early. Thus, average time losses and the stopping rate are declining, when delay is increasing. Respectively, MCSC will be able to influence the energy consumption of a tramway system, even if the driver has no advisory system onboard (approach I). In comparison with common vehicle actuated control (CVAC) previously used at Nürnberger Platz, MCSC reduces the stopping rate from 75 % to 46 % (line 3, delay >2 min). Because MCSC not only respects punctuality, further dependencies may occur, e.g. in case of good road traffic conditions (LOS A/B) tramway preemption can be higher – respectively the stopping rate even declines below 40 %.

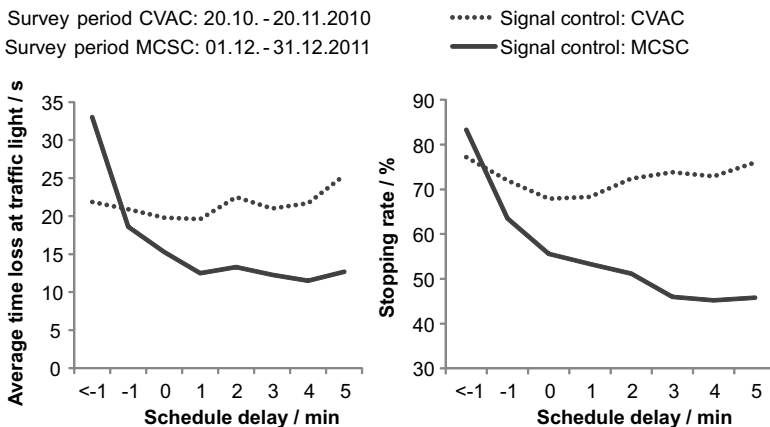


Figure 3: Average time loss (left) and stopping rate (right) depending on deviation from schedule at Nürnberger Platz (Line 3 direction Coschütz, approach I without DAS).

In addition, the DVB AG has been applying the driver advisory system COSEL since June 2012 (approach II). Since, such an advisory system never has been used in regular tramway operation before, several migration stages have been arranged to prove the effects on energy consumption. In summer 2012 twelve voluntary drivers evaluated the system performance of COSEL in regular operation (43 tramways are equipped with COSEL). The results of several hundred runs per month document the drivability of given advice by COSEL in urban tramway environment.

Figure 4 (left side) illustrates two runs between stop Reichenbachstraße and stop Nürnberger Platz. COSEL calculates optimum trajectories depending on green phases

of two traffic lights running independently of one another. Even if gradients strongly vary on this section (0 % to 4 %) the drivers are able to follow advice and finally avoid stops at traffic lights. For the sake of high acceptance the experiences of the drivers have also been implemented in software updates. As long as COSEL is not implemented on an OBU (On-Board-Unit) the software runs on a smartphone (COSELMobile). The device is installed in the driver's cabin (see figure 4 right side). The smartphone communicates with MCSC via WLAN, calculates optimum driving trajectories and displays the driving advice.

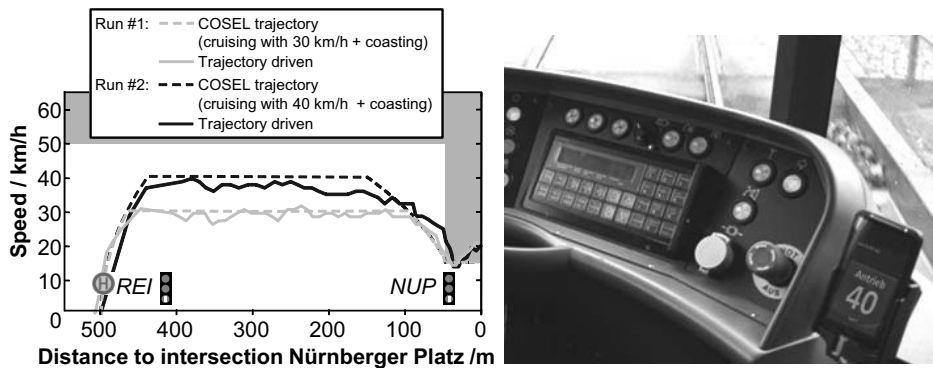


Figure 4: Driver advisory system COSEL (left: two trajectories recommended by COSEL and actual driven in regular operation; right: integration of COSELMobile in the driver's cabin).

The effects on energy consumption depend on the distribution of running time reserves, acceptance rates, recuperation rates and system availability. For data analysis, power data recorded by the Dresden Measuring Tram are used [Har09]. According to that, energy consumption was reduced by 4 % – 12 % per run on the section analysed (between stop Reichenbachstrasse and stop Nürnberger Platz), even if recuperated energy is considered. In summary, operational measures like intelligent traffic control and driver advisory systems are able to make additional potentials accessible to reduce energy consumption in tramway networks. These measures have to be considered as a part of a bundle of measures on various fields of research, which complete each other (e.g. energy recovery systems and operational measure described in this paper) to maximise energy efficiency of public transport at all.

6 Future actions

In 2013/14 approach II will be applied on one of the heaviest charged transport corridors in Dresden. By then, MCSC will control traffic lights of 19 intersections, where the headway of tramways partly falls below two minutes during rush hour.

Moreover, COSEL will be implemented as a module of OBU. In this regard, data transmission will not base on WLAN standard anymore, but on an existing digital data transmission network owned by DVB AG. In addition, approach II will also be applied at the tramway network of Leipzig.

Approach III has not been tested yet. However, first application is planned in 2013.

7 Acknowledgement

The authors would like to thank the Urban Road Department of Dresden (Straßen- und Tiefbauamt Dresden) and the DVB AG for hosting this research and valuable support while development and implementation.

References

- [Har09] M. HARTER, M. BEITELSCHMIDT, G. STRIEGLER, and I. SAUERMANN: "Die Dresdner Messstraßenbahn – Konzept, Architektur, Komponenten". In: *ETR – Eisenbahntechnische Rundschau* 58.12 (2009), pp. 716–721.
- [How95] P. HOWLETT and P. PUDNEY: *Energy-efficient train control*. Berlin: Springer, 1995. ISBN: 978-1-4471-3086-4.
- [Kre12] A. KRETSCHMER and J. KRIMMLING: "The traffic management system VAMOS – from research to regular operation". In: *19th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Vienna, Austria, Oct. 22–26, 2012, paper ID EU-00421.
- [Kri10] J. KRIMMLING and C. GASSEL: "Interfacing ITCS and road traffic control system – a synthesis to increase quality and LRT energy efficiency". In: *10th UITP Light Rail Conference*. Madrid, Spain, Oct. 18–20, 2010.
- [Liu03] R. LIU and I. M. GOLOVITCHER: "Energy-efficient operation of rail vehicles". In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37.10 (2003), pp. 917–932. DOI: 10.1016/j.tra.2003.07.001.
- [Mat11] T. MATSCHEK, C. GASSEL, and J. KRIMMLING: "Cooperative traffic lights under consideration of the needs of public transport and motorized individual transport". In: *8th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Lyon, France, June 6–9, 2011, paper ID 0205.
- [Rai09] RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD LTD, ed.: *Driver advisory information for energy management and regulation. Stage 1 Report*. London, GB, 2009. URL: http://www.rssb.co.uk/SiteCollectionDocuments/pdf/reports/research/T724_stage1_rpt_final.pdf

Corresponding author: Christian Gassel, Technische Universität Dresden, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, phone: +49 351 463-36749, e-mail: christian.gassel@tu-dresden.de

Das Verkehrsmanagementsystem der Region Dresden als Beispiel für intelligente und effiziente Nutzung der Infrastruktur

Gunter Thiele

Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht auf dem DVWG Ringforum Mitteldeutschland, Magdeburg, 16. November 2011 und erschien gleichzeitig in: DEUTSCHE VERKEHRSWISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT (Hrsg.): DVWG-Jahresband 2011/2012 : Perspektive Mobilität – Herausforderungen im gesellschaftlichen Wandel. Berlin, 2012, S. 124–127. ISBN: 978-3-942488-20-4.

Nach wie vor gehen die Verkehrsprognosen von steigenden Verkehrsaufkommen aus. Das gilt sowohl für den Fernverkehr als auch für den Nahverkehr, sowohl für den Güterverkehr als auch für den Personenverkehr. Um dieses prognostizierte Verkehrsaufkommen bewältigen zu können, wären enorme Investitionen in neue Verkehrsinfrastrukturanlagen erforderlich. Vor dem Hintergrund der finanziellen Situation der öffentlichen Haushalte und auch der immer länger dauernden und schwieriger werdenden Genehmigungs- und Entscheidungsprozesse ist jedoch nicht zu erwarten, dass die notwendigen Verkehrsinfrastrukturen in der entsprechenden Zeit bereitgestellt werden können. Da aber bereits heute viele Streckenabschnitte im Straßen- und Schienenverkehrsnetz an und über ihrer Kapazitätsgrenze betrieben werden, muss mit einer weiteren Verschärfung der Probleme gerechnet werden. Die Nutzung von modernen Verkehrsmanagement- und -telematiksystemen bietet allerdings Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. zur Verminderung der bestehenden Verkehrsprobleme, die in diesem Beitrag am Beispiel des Dresdner Verkehrsmanagementsystems VAMOS (Verkehrs-Analysen-Management- und Optimierungs-System) dargestellt werden. Dabei werden die einzelnen Teilkomponenten sowohl mit ihrer Funktionalität beschrieben als auch in ihrem Zusammenwirken miteinander erläutert.

Das Dresdner Verkehrsmanagementsystem VAMOS wurde im Rahmen des Forschungsprojektes intermobil Region Dresden gemeinsam von dem Straßen- und Tiefbauamt der Landeshauptstadt Dresden (STA), dem Autobahnamt Sachsen (ABA) und den Dresdner Verkehrsbetrieben (DVB) entwickelt und aufgebaut. Es ist

intermodal und baulastträgerübergreifend aufgebaut. Das bedeutet, dass nicht nur verschiedene Behörden und Institutionen aus dem Verantwortungsbereich des Individualverkehrs mit dem System verbunden sind, sondern dass es auch eine Verbindung zur Leitzentrale der Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB) gibt.

Die Grundlage des Verkehrsmanagementsystems VAMOS ist eine umfangreiche Datenbasis. Inzwischen sind 38 Dauerschleifen (Doppelinduktionsschleifen), 18 Traffic Eyes, mehrere Strategieschleifen und einfache Induktionsschleifen, die Lichtsignalanlagen, das Parkleitsystem, die Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf den Autobahnen A4 und A17, das RBL-System der DVB, das Verkehrslagezentrum des Sächsischen Staatsministeriums des Innern (SMI) mit den Traffic Message Channel (TMC)-Meldungen und knapp 500 Taxen der Taxigenossenschaft Dresden als Floating Car Data (FCD)-Datenlieferanten online an das System angeschlossen. Diese Detektoren liefern online u. a. Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten, Fahrzeugklassen, Fahrzeugpositionen, Statusmeldungen usw. Je nach Detektor bzw. Erfassungssystem laufen die Daten sekundlich, im Minuten- oder im Viertelstundentakt ein. Die Verkehrsdaten werden automatisch ausgewertet und für jeden Streckenabschnitt wird ein Level of Service (LOS)-Wert ermittelt, so dass schließlich ein aktuelles und detailliertes Verkehrslagebild des Verkehrssystems in der Stadt Dresden zur Verfügung steht. Damit ist das System in der Lage, die Verkehrsteilnehmer automatisch über die aktuelle Verkehrslage oder über Ereignisse zu informieren bzw. auch mit dem dynamischen Wegweisungssystem steuernd einzugreifen oder verkehrsabhängig das optimale Signalprogramm auf ausgewählten koordinierten Streckenzügen auszuwählen. Die Abbildung 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Komponenten des Verkehrsmanagementsystems VAMOS Dresden.

Im Folgenden sollen nun ausgewählte Verkehrsinformations- und -steuerungskomponenten des Verkehrsmanagementsystems VAMOS näher vorgestellt werden. Als wichtige On-Trip-Informationsquelle wurde das Verkehrsinformationssystem aufgebaut. Dazu wurden an wichtigen Einfallstraßen Informationstafeln errichtet, die die Verkehrsteilnehmer über die aktuelle Verkehrslage auf dem Weg bis ins Stadtzentrum sowie über wichtige Ereignisse informieren. Weiterhin werden Informationen aus dem Parkleitsystem, von P+R-Plätzen und aktuelle Abfahrtszeiten aus dem RBL-System angezeigt (Abbildung 2), so dass die Fahrzeugführer die Möglichkeit haben, ggf. auf den ÖPNV umzusteigen, wenn es zu Staus gekommen ist bzw. bei Großereignissen die Parkplätze in der Innenstadt ausgelastet sind.

Neben dem Verkehrsinformationssystem wurden an wichtigen Knotenpunkten im Südwestbereich der Stadt und auf der Autobahn dynamische Wegweiser installiert, die die Verkehrsteilnehmer seit 2007 bei Staus oder Streckensperrungen



Abbildung 1: Das Verkehrsmanagementsystem VAMOS Dresden.



Abbildung 2: Das Verkehrsinformationssystem mit verschiedenen Anzeigebildschirmen.

automatisch auf die optimale Alternativroute führen (Abbildung 3). Das geschieht über Dreikantprismenwender, die die einzelnen Ziele und Stau- bzw. Sperrungsinformationen flexibel für die entsprechenden Richtungen anzeigen können. Es musste jedoch sichergestellt werden, dass die Zielspinnen für jedes Ziel bei allen Schaltungen über alle Knotenpunkte konsistent sind, also kein einmal angezeigtes Ziel im Routenverlauf verloren geht. Dafür und für die automatische Ansteuerung wurden über 220 Schaltstrategien vordefiniert und zwischen den

zuständigen Baulastträgern STA und ABA abgestimmt. Dieses System bewährt sich insbesondere bei Tunnelsperrungen, Baumaßnahmen und bei Großereignissen.

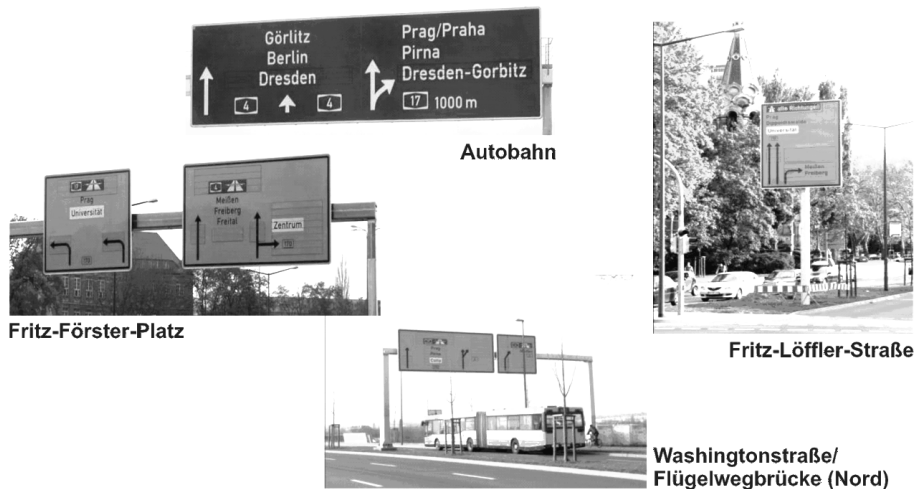


Abbildung 3: Das dynamische Wegweisungssystem der Stadt Dresden.

Eine weitere wichtige Komponente des Dresdner Verkehrsmanagementsystems ist das dynamische Parkleit- und -informationssystem (PLS). Das PLS wurde sowohl mit Zeilen zur Eingabe von Freitext als auch mit der Möglichkeit ausgerüstet, einzelne Richtungspfeile zu drehen. Damit besteht die Möglichkeit, die Verkehrsteilnehmer nicht nur über die aktuelle Situation auf den Parkplätzen zu informieren, sondern sie auch über Sperrungen in Kenntnis setzen und sie in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrssituation über Alternativrouten zu freien Parkplätzen bzw. Parkbereichen führen zu können (Abbildung 4).

Um die Gesamtwirksamkeit des Dresdner Verkehrsmanagementsystems weiter zu verbessern und auch die ÖPNV-Beschleunigung weiter zu optimieren, wird derzeit ein innovativer Ansatz zu LSA-Steuerung entwickelt und umgesetzt. Dabei werden ebenfalls in Abhängigkeit der aktuellen IV- und ÖV-Verkehrslage an wichtigen Knotenpunkten optimale Freigabefenster für sich annähernde ÖPNV-Fahrzeuge ermittelt. Diese werden sekundengenau in die LSA-Steuerung eingeschoben. Die Information über die Freigabe wird an Smartphones in die ÖPNV-Fahrzeuge übertragen und die Fahrer erhalten eine Fahrempfehlung, um den Knotenpunkt ohne Halt passieren zu können. Dadurch kann schließlich Energie eingespart und die Pünktlichkeit des ÖPNV erhöht werden, ohne dass es zu negativen Auswirkungen für den MIV kommt (Abbildung 5). Zusätzlich kann das System zur dynamischen Anschlussssicherung verwendet werden.



Abbildung 4: Das Dresdner Parkleit- und -informationssystem mit dynamischer Routenführung in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslage und von Ereignissen.



Abbildung 5: Innovativer Ansatz für die LSA-Steuerung am Beispiel Nürnberger Platz.

Die beschriebenen Funktionalitäten des Dresdner Verkehrsmanagementsystems sind nur dadurch möglich, dass die einzelnen Komponenten von der Verkehrsdatenerfassung über die Verkehrsinformation bis zur Verkehrslenkung und zum Eingriff in die LSA-Steuerungen optimal miteinander verbunden sind und auch administrative Grenzen überwunden wurden. Nur dadurch gelingt die Umsetzung des intermodalen und baulastträgerübergreifenden operativen Verkehrsmanagements in Dresden.

Die verstärkte Nutzung von Verkehrsmanagementsystemen stellt somit eine gute Möglichkeit zumindest zur Verminderung der Verkehrsprobleme dar. Verkehrsmanagementsysteme tragen zu einer effizienteren Auslastung der derzeit vorhandenen Infrastrukturanlagen bei, in dem durch optimale Verkehrsregelungen Durchflussmengen erhöht und so die Kapazitäten von Streckenabschnitten und Knotenpunkten gesteigert werden. Somit könnte ggf. in einigen Fällen auf Netzausbau- und -erweiterungsmaßnahmen verzichtet werden, bzw. können sie in kleinerem Umfang ausgeführt oder zeitlich zurückgestellt werden. Außerdem leisten Verkehrsmanagementsysteme einen wichtigen Beitrag zur Vermeidung von Unfällen und somit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Verringerte Schadstoff- und Lärmemissionen sind weitere Vorteile des Einsatzes von Verkehrsmanagementsystemen. Verglichen mit den Investitionen in Netzausbau- und Erweiterungsmaßnahmen sind die Kosten für den Aufbau und den Unterhalt von Verkehrsmanagementsystemen wesentlich geringer. Insofern lässt sich mit diesen Maßnahmen ein Beitrag zur intelligenten und effizienten Nutzung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur leisten.

Autor: Gunter Thiele, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Telefon: +49 351 463-36766, E-Mail: gunter.thiele@tu-dresden.de

Determination of Turning Rates Using Floating Car Data

Matthias Körner

Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22–26, 2012, paper ID EU-01002.

Turning rates – the fraction of traffic flows on crossings – are needed for long term (traffic planning, e.g. traffic volume maps) as well as for operational tasks (traffic management, e.g. traffic flow simulations). The manual determination of these rates is state of the art. Therefore volumes of turnings are captured on days with – supposed – representative traffic conditions. The efforts by counting by field workers cause a strong focused use. A fully automated detection is restricted by costs. In particular for traffic management purposes an extensive detection base is needed. So automated detection typically is used complementary to manual campaigns. Against this background the designated permanent and area wide determination of turning rates by using additional benefits of existing structures is getting more and more into focus. A new approach to determine turning rates using a taxi floating car system will be presented.

The construction of a floating car system was ordered by Dresden Department of Transportation in 2007 to get a larger data base for their traffic management system. A cooperation with a Dresden taxi co-operative has been arranged. This enterprise operates about 500 vehicles which stand out due to high driving performance and offer wide area coverage. A short capturing interval was chosen meanwhile vehicle positions were recorded every five seconds added by extra records for stops and starts. A complete reconstruction of driven routes is possible only by map matching what builds the base for further analysis.

To determine turning rates, floating car records representing turnings are recorded. In the following they are sorted by crossing accesses and the fraction is calculated in each case. For a test scenario a comparison between manual logging and the results of such an automated approach was realised (see figure 1).

Result lists of more than 70 manual crossing counts were used, which include in sum more than 1.2 million turnings on about 600 turning relations in more than 200 crossing accesses. Representativeness was guaranteed by selecting eligible acquisition dates and times. Finally, the acquisition took place in third and fourth quarter 2009 all over the urban road network, including major as well as secondary crossings.

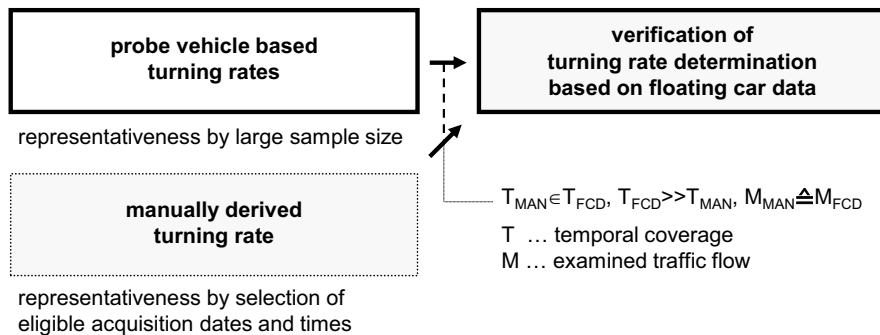


Figure 1: Comparison between manually and automated determined turning rates.

500.000 data sets were used to achieve comparability and representativeness for floating car data. A minimum of turnings per crossing access was defined. So turning rates of 200 crossing accesses could be determined finally and compared with the results of the manual campaigns. Result is a high correlation with 80 % of the compared cases having a deviation less than 20 % (see figure 2).

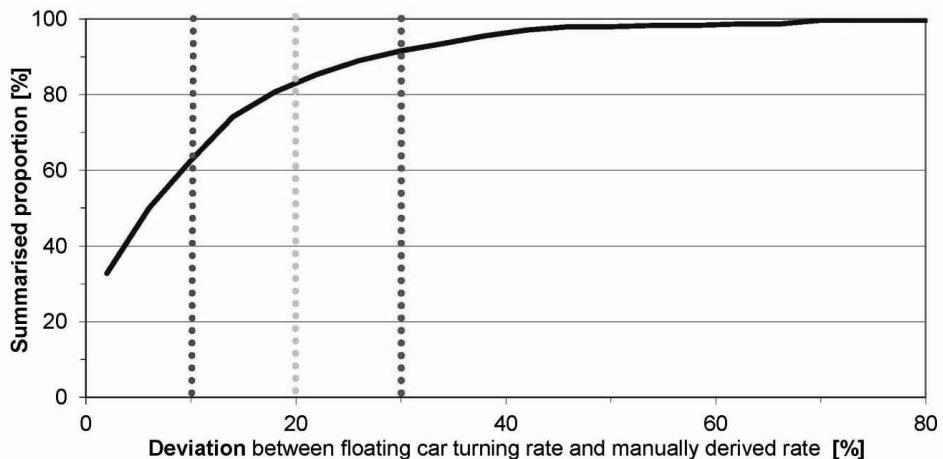


Figure 2: Quality of turning rates derived from Floating Car Data.

Typically, the sketched method could be realised in agglomerations or rural area with available floating car fleets (e.g. taxi and delivery fleets). In future the use of the potentials of smartphones will open up new possibilities to extend the approach. It is a widespread technology with a still high potential of growth. The described approach for turning rate determination seems to be portable with low customising only and provides a much better temporal and spatial coverage than the manual determination.

Selected References

- [Koe09] M. KÖRNER: "Precise online traffic conditions determination by interpretation of velocity curves". In: *EasyWay VIKING Workshop "Best practices on monitoring deployment"*. Hafjell, Norway, Mar. 17, 2009.
- [Reh11] K. REHRL, R. HACKL, S. KRAMPE, and E. STEIGER: "Erkennung von raum-zeitlichen Bewegungsmustern aus GPS-Trajektorien". In: *Angewandte Geoinformatik 2011 - Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg*. Ed. by J. STROBL, T. BLASCHKE, and G. GRIESEBNER. Offenbach, Germany: Wichmann Verlag, 2011, pp. 415–420. ISBN: 978-3-87907-508-9.
- [Sch11] W. SCHNABEL and D. LOHSE: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Berlin, Germany: Beuth-Verlag, 2011. ISBN: 978-3-410-20399-5.

Author: Matthias Körner, Technische Universität Dresden, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, phone: +49 351 463-36768, e-mail: matthias.koerner@tu-dresden.de

3x Benefit by Local Competence – Direct Use of Taxi-FCD to Generate Road Traffic Messages

Matthias Körner

Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22-26, 2012, paper ID EU-0015.

In Germany till the beginning of the last decade the preparation of road traffic information had been realised almost exclusively by governmental institutions and had been sent out to drivers by radio stations. Private content providers and lots of service providers are entering this information market today. This progression is based on technological innovations, mainly more powerful telecommunication (high transfer rates, mobile devices, etc.) and positioning technologies (particularly by GNSS).

The provision of area wide information, from national up to European range and the consideration of interoperability and user friendliness are advantageous changes by which established service providers, like radio stations, get more and more under competitive pressure.

Whereas basic safety services have to be performed by wide range radio stations furthermore, local radio stations focus on high topical and precise regional traffic information as their unique feature against new as well as against well-known competitors. Therefore TMC-based traffic information will be augmented by self determined contents. The founding of and the care about station-related communities monitoring congestion is playing a significant role here. The bigger the community the more traffic jams are discoverable. So there is the interest to get additional information about road traffic occurrences by fleet drivers.

In Dresden, a mid-size German city, a cooperation between the locally focused radio station Radio Dresden, the Dresden taxi-co-operative and the Technische Universität Dresden has been established (see figure 1) for that reason.

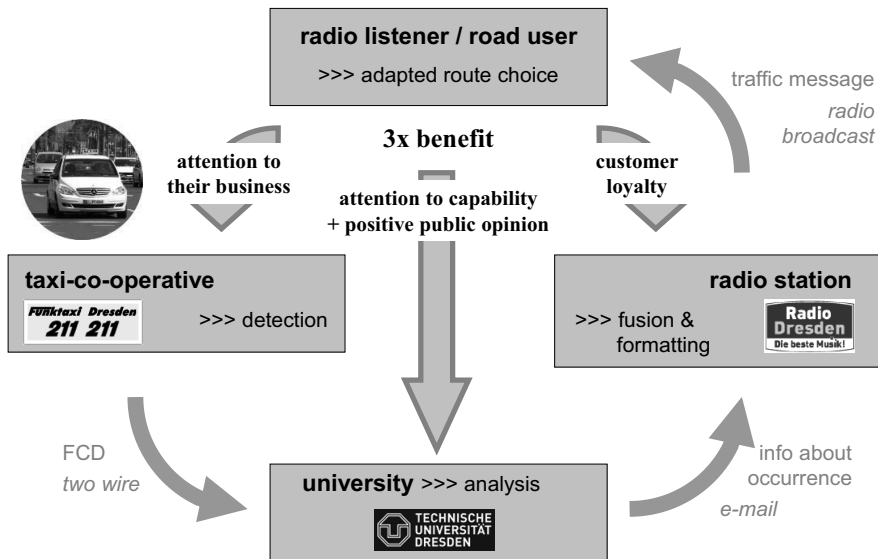


Figure 1: Information flow and benefits.

The taxi-co-operative is providing FCD. These will be analysed regarding traffic occurrences by algorithms, developed by researchers of the Institute of Traffic Telematics at the Technische Universität Dresden. Further traffic information is sent to the traffic news editorial staff of the radio station. Here a fusion with other information as well as the preparation of messages ready to be broadcasted takes place.

Benefit for Radio Dresden is the augmented traffic conditions image of region. So there is an informational advantage against competitors. Benefit for the academic institute is the broad impact emerging of innovation potential and service capability by publication about the developed service. The taxi-co-operative is getting more public attention for its services by referring as data provider in the traffic news.

Therefore speed profiles are analysed to get a 6-stage level of service. Thresholds are used to interpret speed level, time and range of queuing and the number of stops. To focus traffic messages on essential occurrences only information about traffic jams with duration of more than four minutes (see figure 2) are reported to radio station. Of course this calibration is customisable. The chosen approach is transferable to other regions obviously.

Its productive efficiency is demonstrated by identification of about three occurrences in traffic flow, worth to drive around, day by day.

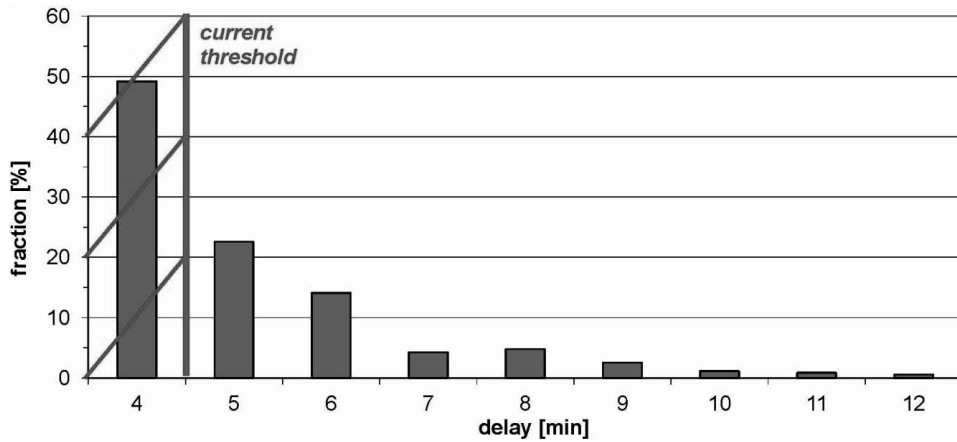


Figure 2: Fraction of determined delays.

Author: Matthias Körner, Technische Universität Dresden, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, phone: +49 351 463-36768, e-mail: matthias.koerner@tu-dresden.de

Energieoptimale Echtzeit-Fahrzeitenregelung bei schienengebundenen Nahverkehrssystemen

Anne Binder, Thomas Albrecht

Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht zu den 23. Verkehrswissenschaftlichen Tagen, Dresden, 29.–30. März 2012.

Zusammenfassung

Das Potenzial energieeffizienter Fahrweisen ist im Stadtschnellbahnbetrieb maßgeblich von den tatsächlich verfügbaren Betriebsreserven abhängig. Diese können aufgrund der auftretenden zufälligen Störungen (z. B. Fahrgastwechsel oder technische Störungen) stark schwanken und erfordern einen regelnden Eingriff, um sowohl die Fahrplaneinhaltung als auch eine hohe Energieeffizienz zu gewährleisten.

Mit der im Beitrag vorgestellten vorausschauenden dynamischen Fahrzeitenregelung ist es möglich, trotz sekundengenauer Fahrplaneinhaltung an wichtigen Halten Energie einzusparen und dabei betriebliche Randbedingungen wie Anschlusseinhaltung oder das bei U-Bahnen häufig angewandte Fahren im Bahnsteigabstand zu berücksichtigen. Anhand einer Fallstudie eines deutschen U-Bahn-Netzes wird die Wirksamkeit der Regelung im Vergleich zur konventionellen Fahrzeitenregelung – Fahrt auf pünktliche Ankunft an jedem Halt – demonstriert.

Schlagnorte: Energieoptimale Zugsteuerung, Fahrzeitenregelung, Stadtschnellbahnen

1 Einleitung

Um schienengebundene Nahverkehrssysteme auch im Zeitalter der Elektromobilität konkurrenzfähig gegenüber dem Individualverkehr betreiben zu können, müssen Reisezeit und Betriebskosten niedrig sein, da erstere die Verkehrsnachfrage, zweitere das Angebot und über die Fahrpreise letztlich wieder die Nachfrage maßgeblich beeinflussen.

Eine Möglichkeit zur Kostensenkung ist die Reduktion des Traktionsenergieverbrauchs der Bahnsysteme durch Umsetzung der energieeffizienten Fahrweise. Hierzu sind in den letzten Jahren sowohl statische Unterstützungssysteme – z. B. Abschalttafeln bei U-Bahnen

[Alb08] – als auch dynamische zugbezogene Assistenzsysteme (z. B. [Alb11; Bel67]) entwickelt und zum praktischen Einsatz gebracht worden. Die erwähnten Systeme sind darauf ausgerichtet, optimale Fahrregime zu ermitteln, mit denen der Zug den nächsten Halt pünktlich und mit minimalem Energieverbrauch erreicht, bei Stadtschnellbahnen mit der typischen Fahrregimefolge Antrieb – Ausrollen – Bremsen reduziert sich meist die Empfehlung auf den Ausrollbeginn.

Das Potenzial energieeffizienter Fahrweisen ist maßgeblich von den im Betrieb verfügbaren Fahrzeitreserven abhängig. Diese sind im Wesentlichen bestimmt durch den Fahrplan mit den geplanten Fahr- und Haltezeiten sowie den sich daraus ergebenden Ankunfts- und Abfahrtszeiten. Die Reserve im Fahrplan ist wegen der Anzahl der für die Umsetzung benötigten Fahrzeuge und Fahrpersonale und der geforderten Reisezeit (Attraktivität) begrenzt.

Im Realbetrieb treten Fahrplanabweichungen auf, u. a. bedingt durch die natürliche Variation des Fahrgastaufkommens und durch technische Störungen. Diese können sich durch Zwangsbedingungen aus Netzinfrastruktur bzw. Sicherungstechnik auf folgende Züge fortpflanzen. Beides führt dazu, dass die real verfügbaren Reserven kleiner oder größer als die geplanten Reserven sein können. Im folgenden Beitrag soll gezeigt werden, wie durch vorausschauende Echtzeit-Regelung der Fahr- und Haltezeiten – also die optimale Nutzung der real verfügbaren Reserven – Energie gespart werden.

Dazu wird zunächst der theoretische Hintergrund der vorausschauenden Fahrzeitenregelung im Abschnitt 2 allgemein erläutert. Im Abschnitt 3 wird dargestellt, wie betriebliche Randbedingungen als Einschränkungen bzw. Erweiterungen des Suchraums des vorgeschlagenen Optimierungsverfahrens integriert werden können. Im Abschnitt 4 werden Wirkungen der Fahrzeitenregelung an einer Fallstudie eines deutschen U-Bahn-Betriebs demonstriert.

2 Theoretischer Hintergrund

Die Optimierung der Fahr- und Haltezeiten im schienengebundenen Nahverkehr stellt insbesondere im Stadtschnellbahn-Verkehr eine komplexe Aufgabe dar, die einerseits unterschiedliche Ziele anstreben soll, andererseits die gegebenen Randbedingungen respektieren muss.

Die möglichen Optimierungsziele

- Fahrplaneinhaltung,
- Anschlusssicherung,
- minimaler Energieverbrauch oder
- Zugfolgezeitenstabilität

können dabei unterschiedlich berücksichtigt werden. Bei deutschen Stadtschnellbahnen wird eine lexikographische Ordnung dieser Gütekriterien angewandt, wobei aus verkehrsvertragsrechtlichen Gründen die Fahrplaneinhaltung das primäre Ziel der Steuerung darstellt. Die Messgröße für die Pünktlichkeit ist in Verkehrsverträgen definiert, häufig wird sie bestimmt

durch den Anteil Fahrten, die mit weniger als einer definierten Verspätung (z. B. 3 min) an bestimmten Halten ankommen.

An den nicht pünktlichkeitsrelevanten Halten (im Sinne des Verkehrsvertrags) sowie innerhalb der festgelegten Grenzen auch an den Messpunkten ergibt sich ein Spielraum für die Echtzeit-Regelung von Fahrzeiten. Dieser kann als Suchraum zur Ermittlung einer Verteilung von Reserven zur bestmöglichen Erfüllung der weiteren verbliebenen Optimierungsziele genutzt werden.

Dabei darf die früheste mögliche Abfahrtszeit $t_{ab,i}^{\text{fFP}}$ (Angabe gegenüber Fahrgast) an keinem Halt unterschritten werden.

2.1 Prinzip der Fahrzeitenregelung

Fahrzeitenregelung über mehrere Abschnitte $j \in [1; J]$ kann als mehrstufiges Entscheidungsproblem betrachtet werden. Unter Berücksichtigung der als konstant angenommenen Haltezeiten $T_{H,i}$ an den Haltestellen $i \in [1; I]$ sind die Fahrzeiten $T_{F,j}$ auf den dazwischen liegenden Abschnitten j gesucht, die die Ankunfts- und Abfahrtszeiten $t_{an,i}$ bzw. $t_{ab,i}$ bestimmen.

Dieser mehrstufige Entscheidungsprozess kann mittels Dynamischer Programmierung gelöst werden, wenn die Gütefunktion die Markow-Eigenschaft besitzt [Oet05].

Dazu werden die Halte i als Prozessstufen betrachtet. Die auf einer Prozessstufe möglichen Zustände x_k entsprechen einer (diskretisierten) Ankunftszeit am Halt. Da die Haltezeiten $T_{H,i}$ – wie z. B. von Oettich und Albrecht in [Oet02] dargelegt – als konstant angenommen werden, entspricht ein Zustand wegen

$$t_{ab,i} = t_{an,i} + T_{H,i} \quad (1)$$

direkt auch einer Abfahrtszeit bzw. unter Kenntnis der minimalen Fahrzeiten $T_{F,j}^{\min}$ auch der am Halt noch verfügbaren Reserve bezogen z. B. auf die pünktliche Ankunft an einem folgenden Messpunkt.

Der Lösungsraum wird dabei auf jeder Prozessstufe durch die früheste mögliche bzw. früheste erlaubte Abfahrtszeit $t_{ab,i}^{\text{fFP}}$ begrenzt:

$$t_{ab,i}^{\min} = \max \left\{ \sum_{j=1}^{i-1} T_{F,j}^{\min} + \sum_{l=1}^{i-1} T_{H,l}; t_{ab,i}^{\text{fFP}} \right\}. \quad (2)$$

Die spätest mögliche Abfahrtszeit $t_{ab,i}^{\max}$ als untere Grenze des Zustandsraums ergibt sich aus der Zeit, mit der bei zeitoptimaler Fahrt nach dem Halt i der nächste Messpunkt gerade noch pünktlich erreicht wird.

Die Ziele Fahrplaneinhaltung, Anschlusssicherung und Zugfolgezeitenstabilität können als Sollzeiten interpretiert werden, die den Suchraum weiter einschränken, dies wird im Abschnitt 3 detailliert erläutert.

Als Gütekriterium für die Fahrzeitenregelung soll hier die Summe des Traktionsenergieverbrauchs über alle Abschnitte gewählt werden. Dieses Kriterium wird nur dann überhaupt

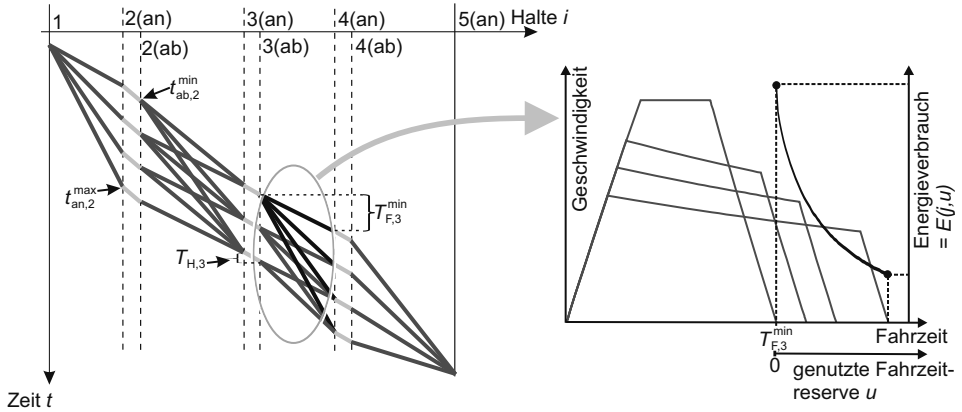


Abbildung 1: Prinzip der Fahrzeitenregelung – Kenngrößen und charakteristische Zusammenhänge

betrachtet, wenn der sich aus den Zeitkriterien ergebende Suchraum mehr als eine Lösung enthält.

Dann wird die energieoptimale Verteilung (optimale Entscheidungspolitik) der Fahrzeitreserve rekursiv gemäß dem Bellman'schen Optimalitätsprinzip ermittelt. Das Gütekriterium Q^* auf einer Stufe i (entspricht dem Halt) und für einen Zustand k (genutzte Zeitreserve am Halt) ergibt sich damit aus:

$$Q^*(i, k) = \min_{\forall u \in U_{i,k}} Q^*(i+1, k+u) + E(j, u). \quad (3)$$

Dabei stellt $E(j, u)$ den Energieverbrauch dar, der sich bei Nutzung der Fahrzeitreserve u und energieoptimaler Fahrweise auf dem Abschnitt j zwischen den Halten i und $i+1$ ergibt.

2.2 Prognose von Haltezeiten

Die Regelung der Fahrzeiten erfordert die Schätzung der verfügbaren Fahrzeitreserve und folglich die Prognose der zukünftigen Haltezeiten für einen konkreten einzelnen Zug.

In der Literatur sind dazu unterschiedliche Verfahren beschrieben: Mikroskopische Modelle nutzen die deterministische Ermittlung der Haltezeit auf Grundlage bekannter oder prognostizierter Ein- und Aussteigerbewegungen [Zha08], mesoskopische Modelle basieren auf der Prognose der Anzahl der Ein- und Aussteiger aus bekannten Quelle-Ziel-Matrizen [Har07] oder durch Annahme eines konstanten Fahrgastzuflusses, so dass bei U-Bahnen die aktuelle Zugfolgezeit genutzt werden kann, um die Anzahl der am Fahrgastwechsel beteiligten Personen und damit die Haltezeit zu schätzen [Bre91; Lin10]. Beide Verfahren wären prinzipiell für die vorliegende Aufgabe geeignet, eine zugfeine Schätzung der zu erwartenden Ein- und Aussteiger mit den heute verfügbaren Sensoren im Fahrzeug bzw. am Bahnsteig ist allerdings praktisch sehr schwierig.

Ebenfalls geeignet sind makroskopische Modelle, die durch die Analyse historischer Daten

die Haltezeitenverteilung ermitteln. Diese Daten sind in Betriebsleitsystemen schon heute verfügbar und sollen deshalb hier genutzt werden. Eine geeignete Filterung nach Haltestellen, Linie, Zeitscheiben oder Fahrzeugeigenschaften wie z. B. die Verteilung der Türen am Bahnsteig führt dazu, dass ein realitätsnahes Abbild der zufälligen Haltezeit an einer Station für die aktuelle Verkehrssituation bzw. den konkreten Zug abgeleitet werden kann.

Kommt bei der Optimierung die nominelle Haltezeitenprognose zum Einsatz, muss durch die Wahl des Quantils [0..1] die Verlässlichkeit der Prognose definiert werden. Soll eine prognostizierte Haltezeit möglichst nicht unterschritten werden, muss das Quantil möglichst hoch gewählt werden. Eine solche pessimistische Prognose führt in den meisten Fällen dazu, dass die Haltezeit überschätzt wird und somit die real verfügbare Fahrzeitsreserve unterschätzt wird. Durch mögliche Nachregelung auf den folgenden Abschnitten kann diese ggf. noch genutzt werden. Weitere Randbedingungen wie z. B. die der frühesten möglichen Abfahrt können die Auswirkungen einer zu pessimistischen Prognose zusätzlich verstärken. Im Gegensatz dazu sind bei einer zu optimistischen Prognose (Unterschätzung der Haltezeiten) die realen Haltezeiten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit länger, so dass dadurch ggf. definierte zeitliche Randbedingungen nicht eingehalten werden können.

3 Anwendungsfälle

3.1 Vorausschauendes Fahren zwischen wichtigen Halten

Ausgehend von der Netzstruktur und den Bemessungskriterien für die Pünktlichkeit muss vom Betreiber eines Stadtschnellbahnsystems zugfein festgelegt werden, welche Fahrplanabweichungen toleriert werden können. Es können dabei Halte existieren, wo die Ankunft / Abfahrt innerhalb eines definierten Zeitfensters (oder Zielfensters [Oet02]) akzeptiert wird. Zeitfenster werden durch die früheste Abfahrt $t_{ab,i}^{\min}$ und die spätest mögliche Ankunftszeit $t_{an,i}^{\max}$ begrenzt, die sich aus der maximal tolerierten Verspätung oder der geringsten durch Aussteiger bzw. an den Bahnsteigen wartenden Fahrgästen als Verspätung wahrgenommenen Fahrplanabweichung ergibt. Das Zeitfenster an einem Halt i hat Auswirkungen sowohl auf die Größe der Zeitfenster davor als auch danach, denn es gilt:

$$t_{ab,i+1}^{\min} = \max(t_{ab,i+1}^{\min}; t_{ab,i}^{\min} + T_{F,j}^{\min} + T_{H,i+1}) \quad (4)$$

und

$$t_{ab,i}^{\max} = \min(t_{ab,i}^{\max}; t_{ab,i+1}^{\max} - T_{F,j}^{\min} - T_{H,i}) \quad (5)$$

unter Beachtung der prognostizierten Haltezeiten.

Würde am Linienende ein Zeitfenster zur Ankunft akzeptiert, führte eine Minimierung des Traktionsenergieverbrauchs immer zur Ankunft am Ende des Zeitfensters $t_{an,I}^{\max}$. Entspräche die Größe des Zeitfensters der Pünktlichkeitsbemessungsgrenze, würden schon kleine Störungen eine Verletzung dieser Grenze bewirken und damit das Risiko von Pönalezahlungen in sich bergen. Deshalb entarten Zeitfenster an wichtigen Halten – z. B. Linienenden

oder -verzweigungen, aber auch Anschlussstationen – häufig zu einzelnen Zeitpunkten mit $t_{an,i}^{\min} = t_{an,i}^{\max}$, wodurch eine sekundengenaue Ankunft erzwungen werden kann.

Treten dann zufällige Fahrplanabweichungen am unteren Ende des Zeitfensters auf, würde die zeitoptimale Fahrweise T^{\min} empfohlen und damit das Risiko pönalerelevanter Verspätungen reduziert.

3.2 Anschlusseinhaltung

Obwohl Anschlusshaltestellen oftmals ebenso wichtige Haltestellen sind, kann durch eine separate linienübergreifende Beachtung dieser Haltestellen zusätzliches Potenzial erschlossen werden.

Im Falle eines verspäteten Zubringers am Anschlusshalt I_A , kann die dadurch auftretende Wartezeit des Abbringers als zusätzliche Zeitreserve des Abbringers auf den vorherliegenden Abschnitten $i < I_A$ genutzt werden, sofern die $t_{an,i}^{\max}$ eingehalten werden können. Dazu wird die Ankunftszeit des Abbringers am Anschlussbahnhof modifiziert auf die (prognostizierte) Ankunftszeit des Zubringers abzüglich Umstiegszeiten und ggf. weiterer Pufferzeiten.

Wird die Ankunftszeit des Zubringers unterschätzt (Zubringer trifft später ein als erwartet), führt dies dazu, dass nicht das gesamte Potenzial der vorausschauenden Fahrweise ausgeschöpft werden kann. Eine Überschätzung der Ankunftszeit des Zubringers (Zubringer trifft früher ein als erwartet) hat zur Folge, dass sowohl Zu- als auch Abbringer zusätzlich verspätet werden.

3.3 Vermeidung betrieblicher Konflikte

Stadtschnellbahnstrecken können auf Außenästen teilweise eingleisige Abschnitte enthalten. Darüber hinaus können bei Störungen, Bauarbeiten etc. auch außerplanmäßig eingleisige Streckenabschnitte im Betrieb auftreten.

Bei Verspätungen eines Zuges auf einem eingleisigen Abschnitt kann sich die Verspätung (unter Abzug der im Fahrplan enthaltenen Pufferzeit) direkt auf den Gegenzug übertragen. Es ergibt sich ein frühestmöglicher Zeitpunkt, an dem der Gegenzug in den eingleisigen Streckenabschnitt einfahren kann.

Der Unterschied zwischen geplanter Einfahrt in den eingleisigen Abschnitt und dem sich aus der realen Betriebslage ergebenden frühestmöglichen Zeitpunkt kann als zusätzliche Ist-Reserve durch den Gegenzug genutzt werden. Dabei besteht einerseits die Möglichkeit, diese Reserve zur Verlängerung der Haltezeit an einem der Halte vor dem eingleisigen Abschnitt zu nutzen, andererseits kann sie auch entsprechend der Vorgehensweise bei verspäteten Zubringern bei Anschlüssen als zusätzliche Fahrzeitreserve und damit zur Reduktion des Energieverbrauchs eingesetzt werden.

Bei hochfrequenten Stadtschnellbahnen, die im Tunnel verkehren, sollen betrieblich bedingte Halte im Tunnel (z. B. bei dichter Zugfolge) aus Gründen des Fahrgastkomforts und der Fahrgastsicherheit möglichst vermieden werden. Betrieblich kann dies durch das sogenannte „Fahren im Bahnsteigabstand“ realisiert werden, wobei ein Zug nicht früher einen

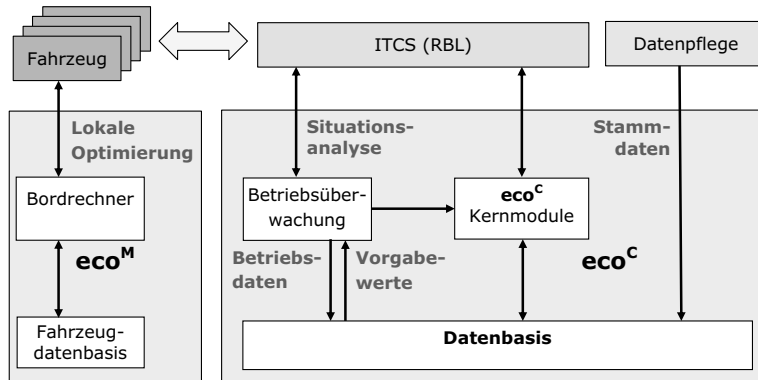


Abbildung 2: Konzept für eine Leitsystemarchitektur nach dem Projektansatz von ELS

Bahnsteig verlassen darf, bevor der Streckenabschnitt, der den nächsten anzufahrenden Bahnsteig enthält, freigemeldet worden ist.

Die frühestmögliche Abfahrtszeit eines Zuges z an einem Halt i ergibt sich damit aus der Abfahrtszeit des vorigen Zuges $z - 1$ vom in Fahrtrichtung voraus liegenden nächsten Bahnsteig $i + 1$ einschließlich der Räumfahrzeit für den betreffenden Gleisfreimeldeabschnitt.

Für den Folgezug kann diese betriebliche Randbedingung wieder zu Ist-Reserven führen, die sowohl durch zusätzliches Warten am Halt als auch durch vorausschauend langsames und energiesparendes Fahren umgesetzt werden kann. Notwendig hierfür ist eine hochgenaue Prognose der Abfahrtszeit des vorausfahrenden Zuges $z - 1$. Eine vorausschauende Fahrweise ist besonders bei Abschnitten sinnvoll, wo die Summe aus Fahrzeit und darauf folgender Haltezeit signifikant ansteigt ($T_{F,j} + T_{H,i+1} \gg T_{F,j-1} + T_{H,i}$), d. h. entweder im Bereich vor Halten mit großen Haltezeiten oder beim Übergang aus dem Stadtzentrumsbereich mit kurzen Halteabständen in den Bereich von Vororten mit Abschnitten längerer Fahrdauer.

4 Fallstudie U-Bahn

4.1 Projektansatz ELS

Im Projekt ELS (Energieoptimiertes Leit- und Störfallmanagement) sollen Verfahren und Komponenten zur Steigerung der Energieeffizienz des Betriebes von signalgesteuerten Stadtschnellbahnen entwickelt und erprobt werden.

Das Gesamtkonzept (vgl. Abbildung 2) beinhaltet u. a. Verfahren zur Disposition und Störfallbeseitigung in der zentralen Komponente eco-C, Vorschläge zur Standardisierung von Schnittstellen für den Echtzeit-Datenaustausch sowie die Umsetzung innovativer Mensch-Maschine-Schnittstellen in der Leittechnik sowie zur Fahrerunterstützung bei der vorausschauenden energiesparenden Fahrweise (Fahrzeugkomponente eco-M).

Ein Bestandteil des Projekts ist die Entwicklung neuer Verfahren zur Echtzeitregelung von

Fahr- und Haltezeiten bei der tatsächlichen Betriebsführung, d. h. hier werden wie oben beschrieben Fahr- und Haltezeiten im Sekundenbereich modifiziert (als Bestandteil von eco-C), die dann als Grundlage für die energieoptimale Zugsteuerung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halten dienen (Umsetzung innerhalb eco-M).

4.2 Effekte der vorausschauenden Fahrzeitenregelung

Um die Effekte der vorausschauenden Fahrweise in einem Schienenverkehrssystem zu quantifizieren wurde der Betrieb einer U-Bahn-Linie eines deutschen U-Bahn-Betriebs simuliert. Auf der Linie befinden sich 13 Haltestellen, diese werden im 10-Minuten-Takt durch insgesamt acht Fahrzeuge linienrein angefahren. Um unterschiedliche Betriebsverfahren zu vergleichen wird einerseits das Fahren gemäß sekundengenauem Fahrplan und das vorausschauende Fahren bis zum folgenden Messpunkt simuliert. Als wichtige Haltestellen mit sekundengenauer Ankunft gelten jeweils die sich an den Endpunkten befindenden Haltestellen und eine zusätzliche Unterwegshaltestelle. Dies führt dazu, dass über jeweils sechs Abschnitte die dynamische Fahrzeitenregelung angewendet werden kann, da dort Zeitfenster definiert sind (Ankunft spätestens 30 s nach geplanter Abfahrtsminute).

Die für die vorausschauende Fahrzeitenregelung notwendige Prognose der zukünftigen Haltestellenaufenthaltszeiten wird dabei auf den planmäßigen Wert der Haltezeit 30 s an allen Halten gesetzt. Die Fahrzeiten einschließlich der minimalen Fahrzeiten auf den einzelnen Abschnitten und die dazugehörigen Energieverbräuche können einer hinterlegten Abschaltabelle entnommen werden. Um eine Betriebssimulation durchzuführen, werden die einzelnen Prozesse Fahren und Halten simuliert. Das Fahren auf einem Abschnitt wird dabei als nominell angenommen. Folglich entsprechen die realisierten Fahrtzeiten auf einem Abschnitt den durch die Regelung vorgegebenen und in den Abschaltabellen hinterlegten Fahrzeiten. Die Haltezeiten an den einzelnen Haltestellen hingegen werden zufällig auf Grundlage real gemessener Haltestellenaufenthaltszeiten simuliert. Durch mehrfache Simulationen des gleichen Szenarios (Monte-Carlo-Simulation [Pot75]) sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsarten quantifiziert werden. Dabei wird zunächst ein Anfangszustand basierend auf real gemessenen Daten aus dem Betriebsleitsystem erzeugt. Ausgehend davon wird der Betrieb über den Zeitraum einer Stunde simuliert, dabei entstehen unterschiedliche Betriebs-situationen durch die Zufälligkeit des Fahrgastwechsels. Insgesamt werden zwölf komplette Umläufe simuliert.

Abbildung 3 und Tabelle 1 zeigen den Weg-Zeit-Verlauf eines Fahrzeuges zwischen zwei wichtigen Halten aus der Simulation und den simulierten Kenngrößen auf dem gezeigten Streckenabschnitt. Dabei wird der Effekt der dynamischen Fahrzeitenregelung deutlich. Obwohl die diskrete Datengrundlage nur einen geringen Spielraum für die Verteilung der prognostizierten Fahrzeitreserve zulässt, können die Fahrzeiten im Sekundenbereich zu Gunsten des Energieverbrauches modifiziert werden und in diesem positiven Szenarioausschnitt zu einer Verringerung des Energieverbrauches um 9 % führen, da hier die vorhandenen Abschaltabellen den nötigen Spielraum gewähren.

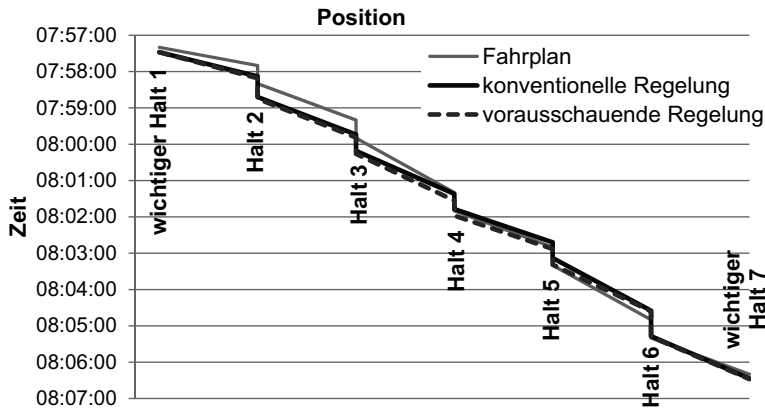


Abbildung 3: Weg-Zeit-Verlauf einer Simulationsfahrt zwischen zwei wichtigen Halten unter Anwendung der unterschiedlichen Fahrzeitenregelungsarten

Tabelle 1: Simulationsergebnisse einer Simulationsfahrt zwischen zwei wichtigen Halten und Anwendung der unterschiedlichen Fahrzeitenregelungsarten.

	plan- mäßige Ankunft	tatsächliche Ankunfts- fahrplan- abweichung in Sekunden		plan- mäßige Abfahrt	tatsächliche Abfahrt- fahrplan- abweichung in Sekunden		Fahrzeit in Sekunden		Energie- verbrauch in MJ	
		(1)	(2)		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Halt 1	-	-	-	07:57:20	+8	+8	40	43	12,7	8,8
Halt 2	07:57:50	+18	+21	07:58:20	+22	+25	62	64	21,3	18,9
Halt 3	07:59:20	+24	+29	07:59:50	+21	+26	71	77	22,0	14,7
Halt 4	08:01:20	+2	+13	08:01:50	-3	+8	55	55	12,4	12,4
Halt 5	08:02:50	-8	+3	08:03:20	-12	-1	87	77	29,3	32,5
Halt 6	08:04:50	-15	-14	08:05:20	-3	-2	70	70	15,6	15,6
Halt 7	08:06:20	+7	+8	-	-	-				
Gesamt							385	386	113,2	102,8

(1) konventionelle Regelung

(2) vorausschauende Regelung

Tabelle 2 fasst die Ergebnisse der unterschiedlichen Simulationsdurchläufe zusammen. Dabei wird der Einfluss der dynamischen Fahrzeitenregelung auf die zwei relevanten Kriterien – Fahrplanabweichung pro Fahrzeugabfahrt und Energieverbrauch – deutlich. Es zeigt sich, dass durch das vorausschauende Aufholen von Verspätungen bis zum nächsten wichtigen Halt in allen Durchläufen Energieeinsparungen von etwa 6 % auftreten. Als Konsequenz der energieoptimalen Fahrzeitenregelung erhöht sich die mittlere Fahrplanabweichung pro Abfahrt geringfügig. Allerdings führt dies – auch aufgrund der eng gewählten Zeitfenster –

nicht zu einem erhöhten Anteil unpünktlicher Fahrten im Sinne der pönalerelevanten Pünktlichkeit.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse.

Simulations- szenario	Konventionelle Fahrzeitenregelung		Dynamische Fahrzeitenregelung		Potenzielle Energie- einsparung
	Gesamt- energie- verbrauch in MJ	mittlere Fahrplan- abweichung pro Abfahrt in s	Gesamt- energie- verbrauch in MJ	mittlere Fahrplan- abweichung pro Abfahrt in s	
(1)	3605	11,7	3399	12,5	5,7 %
(2)	3613	13,0	3399	13,2	5,9 %
(3)	3634	12,1	3414	12,5	6,0 %
(4)	3617	12,2	3404	12,3	5,9 %
(5)	3645	11,1	3427	11,5	6,0 %

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist darauf zu achten, dass der Simulation ausschließlich diskrete Abschalttabellen zu Grunde liegen, welche nicht für alle Abschnitte mögliche Abstufungen der Fahrzeiten und Energieverbräuche zulassen. Beispielsweise liegen dabei Abschnitte vor, für welche nur eine einzige Fahrzeit- und Energieverbrauchskombination vorliegt, was zur Anwendung dieser Fahrzeit sowohl bei der konventionellen als auch vorraus-schauenden Fahrweise führt. Die Höchstzahl an möglichen Fahrzeiten auf einem Abschnitt liegt bei fünf. Dies ist ausreichend, um die Fahrzeitenregelung über mehrere Abschnitte sinnvoll anzuwenden.

Die Effektivität der dynamischen Fahrzeitenregelung könnte durch die Generierung weiterer möglicher Fahrzeiten-Energieverbrauchs-Kombinationen gesteigert werden. Müssten mehr Zielpunkte im Linienverlauf berücksichtigt werden, würde sich das Einsparpotenzial verringern.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mittels Echtzeitregelung von Fahrzeiten lassen sich im realen Betrieb vorhandene Reserven für die energiesparende Zugsteuerung nutzen und dadurch zusätzliche Energiesparpotenziale erschließen. Innerhalb der entwickelten mehrstufigen Prozessarchitektur kann die Komponente der Fahr- und Haltezeitenregelung zu einer hohen Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen für die energiesparende Fahrweise beitragen, indem das intuitive Fahrerverhalten („es gibt genügend Reserven bis zum nächsten wichtigen Halt . . .“) sich praktisch auch häufig in den Fahrempfehlungen widerspiegelt. Wichtige Komponente für die Generierung verlässlicher Empfehlungen ist das Verfahren für die Prognose der Haltezeiten, hier ist z. B. unter Nutzung von Fahrgastzählssystemen oder von Informationen aus e-Ticketing-Systemen weiteres Forschungspotenzial zu sehen.

Im beschriebenen Ansatz werden betriebliche Randbedingungen (z. B. die sekundengenaue Einhaltung von Ankunftszeiten an wichtigen Halten) als Einschränkungen des Suchraums interpretiert und die Verletzung der Randbedingungen erst bei der Simulation festgestellt. Als Weiterentwicklung dieses Ansatzes sollen stochastische Zustandsübergänge an Zwischenhalten in die Dynamische Programmierung integriert werden und die resultierende potenzielle Fahrplanabweichung als zweites Gütekriterium in die Fahrzeitenregelung integriert werden. Das dabei zu lösende mehrkriterielle Optimierungsproblem und die hierfür festzulegenden Wichtungsfaktoren sind weitere Diskussionspunkte insbesondere mit zukünftigen Nutzern und Betreibern solcher Regelungsstrategien.

Mit der im Projekt ELS vorangetriebenen zukünftigen Generation von Leitsystemen, bei denen der Gedanke der Energieoptimalität praktisch der Systemarchitektur zugrunde liegt, ist der Stadtschnellbahnbetrieb gewappnet für die zunehmend stärkere Konkurrenzsituation zwischen den Verkehrsträgern auf dem Gebiet der Umweltfreundlichkeit, insbesondere mit elektrisch angetriebenen Personenkraftwagen im städtischen Umfeld.

Danksagung

Die beschriebenen Verfahren greifen zurück auf Ergebnisse des BMWi-Projekts „intermobil Region Dresden“ und wurden im Rahmen des Forschungsprojekts ELS erweitert. Die TU Dresden forscht dabei im Unterauftrag der Institut für Bahntechnik GmbH mit Kofinanzierung durch ASCI Systemhaus GmbH, Human Factors Consult GmbH und blic GmbH. Das Forschungsvorhaben ELS wird durch die TSB Technologiestiftung Berlin aus Mitteln des Zukunftsfonds des Landes Berlin gefördert, kofinanziert von der Europäischen Union – Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung.

Literatur

- [Alb08] T. ALBRECHT: „Energy-Efficient Train Operation“. In: *Railway Timetable & Traffic*. Hrsg. von I. A. HANSEN und J. PACHL. Eurailpress, 2008, S. 83–105. ISBN: 978-3-7771-0371-6.
- [Alb11] T. ALBRECHT, A. BINDER und C. GASSEL: „An overview on real-time speed control in rail-bound public transportation systems“. In: *2nd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*. Leuven, Belgium, 22.–24. Juni 2011, paper ID 053. URL: <http://www.mech.kuleuven.be/MT-ITS2011/download/proceedings.html>.
- [Bel67] R. BELLMAN: *Dynamische Programmierung und selbstanpassende Regelungsprozesse*. München: Oldenbourg-Verlag, 1967.
- [Bre91] V. V. BREUSEGEM, G. CAMPION und G. BASTIN: „Traffic Modeling and State Feedback Control for Metro Lines“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.7 (1991), S. 770–784. DOI: 10.1109/9.85057.

- [Har07] N. G. HARRIS und R. ANDERSON: „An international comparison of urban rail boarding and alighting rates“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 221.4 (2007), S. 521–526. URL: <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/31439703.PDF>.
- [Lin10] W. LIN und J. W. SHEU: „Automatic train regulation for metro lines using dual heuristic dynamic programming“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 224.1 (2010), S. 15–23. DOI: 10.1243/09544097JRRT283.
- [Oet02] S. OETTICH und T. ALBRECHT: „Anschlussoptimierende und ressourcenschonende Steuerung des Stadtschnellbahnbetriebs: Ein mehrkriterieller Ansatz zur Echtzeit-Optimierung“. In: *Automatisierungstechnik* 50.12 (2002), S. 597–605. URL: <http://www.oldenbourg-link.com/doi/pdf/10.1524/auto.2002.50.12.597>.
- [Oet05] S. OETTICH: „Die flexible S-Bahn: Energiesparende und anschlussoptimierende Flexibilisierung der Fahrweisen und Fahrzeiten – Das neuartige Fahrerassistenzsystem ENAflex-S“. Dissertation. Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, 2005. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-1118672634107-40075>.
- [Pot75] G. POTTHOFF: *Verkehrsströmungslehre*. Berlin: Transpress, Verlag für Verkehrswesen, 1975.
- [Rah11] K. RAHN: „Green Mobility – Effiziente Zugbeeinflussung mit CBTC-Systemen“. In: *Signal + Draht* 103.10 (2011), S. 26–29.
- [Zha08] Q. ZHANG, B. HAN und D. LI: „Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations“. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16.5 (2008), S. 635–649. DOI: 10.1016/j.trc.2007.12.001.

Korrespondierender Autor: Anne Binder, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Telefon: +49 351 463-36764, E-Mail: anne.binder@tu-dresden.de

Experiences with Video-Based Parking Space Surveillance

Klaus-Peter Döge, Jürgen Krimmling

Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22–26, 2012, paper ID EU-00537.

Abstract

In general, diverse and sometimes severe environmental conditions are still a challenge for video-based traffic analysis. Additionally, most commercial image processing software depends on a particular camera model, and it must be calibrated by a professional. The research goal of the presented work was to resolve these problems with a novel in-house development. Due to the lack of motion information and light produced by the vehicles at night, video based parking space surveillance is a special challenge. The method developed does not disclose vehicle-specific characteristics; only stochastic and non-specific characteristics are used for image processing. The results showed a good robustness against weather and lighting conditions, while the measurement failure is sufficient to the geometric distribution.

Keywords: Video Detection, Parking Space Surveillance, Traffic Management, Measurement Failure Model

1 Introduction

Video detection has been an established part of modern traffic management systems for several years. Nevertheless, three major problems are known. First, most commercial image-processing software is restricted to a particular camera model; secondly, this software must be calibrated by a professional. Finally, diverse and sometimes severe environmental conditions are still a challenge for most algorithms. The solutions provided by the literature are not suitable for our requirements. Video surveillance utilising image sequences is described in [For04]. An approach using geometric features from aerial images can be found in [Wan98]. Tracking and recording of the movement of vehicles to find an empty parking space is described in

[Lee05]. In [Gup00] the calculation of the width and length of vehicles based on shapes and trigonometric relations is proposed. Methods [For04, Wan98, Lee05, Gup00] have high computational and storage requirements. A method based on the trajectories of vehicle movement is described in [Bev07]. Our camera installation collects little environment information, so we were not able to trace trajectories after all. The popular stereo camera methods, as mentioned e.g. in [Oha97], required still too expensive hardware components for a project of this size. Many applications based on licence plate recognition had been developed, e.g. [Alv04]. There were some problems in the realisation of such a system, such as occlusion of licence plates, deep-mounted cameras and data protection – with the latter being the most significant problem. For all these reasons, we developed a new algorithm. This paper is organised as follows: first, a short description of the technical framework, followed by vehicle identification with non-specific characteristics, then results and experiences.

2 Technical framework

Our camera installation consists of networked cameras with additional infrared light on 10 m pylons (figure 1). Because of the occlusion of the middle parking space by the adjacent vehicles we need two cameras for five parking spaces. The power consumption is about 5 W for the cameras, and 80 W for the infrared light. Every viewing direction yields significant features for vehicle recognition, but it is important to preserve the privacy of the driver. Therefore, in an acceptable system, the camera should look at the vehicles from behind. An image resolution of 640 x 480 pixels is sufficient for image processing and the display of alarm-triggered images.

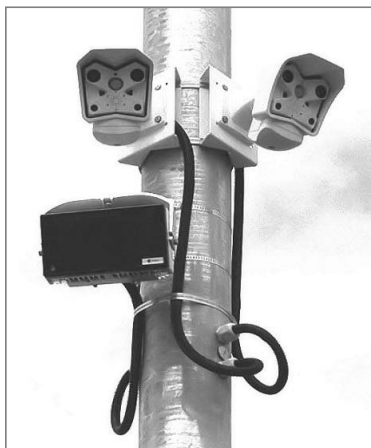


Figure 1: Typical installation with IP-cameras and infrared light.

3 Vehicle identification with non-specific characteristics

In the scope of parking space surveillance we had to solve for two main tasks: the counting of free parking spaces and the triggering of alarm pictures in case of illegal parking at the entrance or exit of the parking area. Figure 2 illustrates the typical problems we had to solve. Because of all these reasons, a vehicle-independent measure for all types of vehicles under all viewing conditions is needed. As an appropriate signal model for that, we have identified the vertical edges on the masked parking space. In order to obtain vehicle-independent representation, the masked parking space will be High-Pass filtered. This ensures that the result differs significantly between the free and occupied parking spaces.

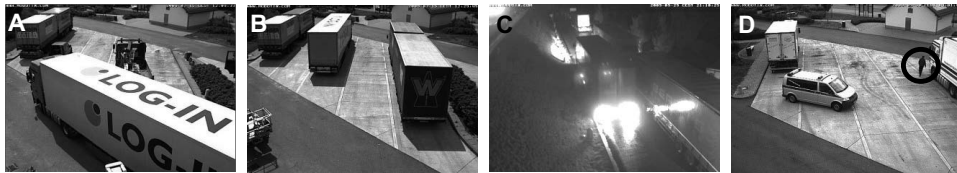


Figure 2: Typical problems for video detection of stationary traffic: passing vehicles (A), shadows (B), day-night differences (C) and unpredictable situations (D).

Afterwards the calculation and interpretation of the Hough Transform leads to binary information: 1 for “occupied parking space” and 0 for “free parking space”. To consider different lighting conditions, including day-night differences, an adaptive threshold for edge detection had to be developed. Furthermore, an algorithm for the automated interpretation of the Hough Transform was necessary, since this transform yields only a measure of the intensity of the edges. These details are described completely in [Dög10], since we focused on properties and experiences with the system in this paper.

4 Vehicle identification with non-specific characteristics

The prototype system for parking space surveillance was installed on the PWC Nöthnitzgrund, driving direction Prague, on the A 17 motorway in Germany. Figure 3 shows a programmed information board with the number of free parking spaces.

The accuracy of the system was determined through 1078 images, including shadows, rain and darkness. Under these circumstances we have identified a combined accuracy of 80 %. The measurement failure is sufficient to the Geometric Distribution with a mean of 0.23 and a variance of 0.38. The system works thanks to the infrared lighting at night as well as during the day. This ability had been externally evaluated [Bun10]. For a timeframe for image analysis and transmission,

one minute is sufficient. Significant changes in the situation normally do not occur within this time period, so it is sufficient to register it after one minute.



Figure 3: Programmed information board with the number of free parking spaces. The result can be verified by the image in real-time. The middle image shows two examples for triggering alarm images while someone was parked in the exit of the parking area.

5 Conclusion and future work

This paper presented a novel system for 24-hour, video-based parking space surveillance. The image processing is based on non-specific and stochastic features of the vehicles, which leads to a high robustness in different and severe viewing conditions. But since shadows cause edges that can be similar to vehicles, it is not easy to account for them. A simple shadow handler has already been implemented, but some additional research and literature review must be done in the future in order for the system to become an important component of future traffic management on the motorways of the Free State of Saxony (Germany). The system will be enlarged over time.

References

- [Alv04] J. ALVES and F. JAMES: *System for recognizing the same vehicle at different times and places*. US-Patent US 6747687 B1, Jun 8, 2004.
- [Bev07] A. BEVILACQUA and S. VACCARI: "Time Detection of stopped vehicles in traffic scenes". In: *IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. London, GB, Sept. 5–7, 2007. DOI: 10.1109/AVSS.2007.4425321.
- [Bun10] BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (BAST): *Evaluierung von Pilotprojekten zu telematischen Verfahren für Lkw-Parken auf Bundesautobahnen*. Second progress

report – FE 23.0010/2009/IRB. Bergisch Gladbach, Germany, 2010.

- [Dög10] K.-P. DÖGE and J. KRIMMLING: “Videobasierte Analyse des ruhenden Verkehrs: Theorie und Anwendung am Beispiel PWC-Nöthnitzgrund Dresden”. In: *VDI-Bericht 2092* (2010), pp. 331–335.
- [For04] G. L. FORESTI, G. L. MICHELONI, and L. SNIDARO: “Event classification for automatic visual-based surveillance of parking lots”. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*. Cambridge, GB, Aug. 23–26, 2004. vol. 3, pp. 314–317. DOI: 10.1109/ICPR.2004.1334530.
- [Gup00] S. GUPTA, O. MASOUD, and N. P. PAPANIKOLOPOULOS. “Vision-based vehicle classification”. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation System*. Dearborn, MI, USA, Oct. 1–3, 2000. pp. 46–51. DOI: 10.1109/ITSC.2000.881016.
- [Oha97] K. OHASHI, M. KIMACHI, and K. KANAYAMA: “Vehicle Recognition from parking images using stereo method”. In: *4th World Congress on Intelligent Transport Systems: mobility for everybody*. Berlin, Germany, Oct. 21–24, 1997.
- [Lee05] C.-H. LEE, M.-G. WEN, C.-C. HAN, and D.-C. KOU: “An automatic monitoring approach for unsupervised parking lots in outdoors”. In: *39th Annual International Carnahan Conference Security Technology, CCST’05*. Las Palmas, Spain, Oct. 11–14, 2005. pp. 271–274. DOI: 10.1109/CCST.2005.1594862.
- [Wan98] X. G. WANG and A. R. HANSON: “Parking lot analysis and visualization from aerial images”. In: *Proceedings in Fourth IEEE Workshop Applications of Computer Vision (WACV ’98)*. Princetown, NJ, USA, Oct. 19–21, 1998. pp. 36–41. DOI: 10.1109/ACV.1998.732855.

Corresponding author: Jürgen Krimmling, Technische Universität Dresden, “Friedrich List” Faculty of Transport and Traffic Sciences, phone: +49 351 463-36750, e-mail: juergen.krimmling@tu-dresden.de

Microscopic Real-Time Simulation of Dresden Using Data from the Traffic Management System VAMOS

Robert Oertel¹, Mario Krumnow², Jürgen Krimmling², Peter Wagner¹

¹ German Aerospace Center

² Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22–26, 2012, paper ID EU-00337.

Abstract

In the city of Dresden the VAMOS traffic management system is developed to collect all available traffic-related data from numerous detectors and to process them for monitoring and decision making. In most cases aggregated traffic data is used to define traffic management interventions and strategies. In some cases, especially for choosing the strategy for the next time period, it is useful to reflect first on the current traffic situation, in order to examine the effects of different strategies. This is done by the microscopic traffic simulation software SUMO, which has a real-time I/O data interface. This means that an interaction during the simulation is possible, importing current detection data and traffic signal states from the field now, in order to obtain effects on e.g. delays, tailbacks, emissions and noise just a moment later. Based on these results an advice about which strategy is most efficient can be given. In this paper the system's setup is described, supplemented by two of the first examples of its use.

Keywords: Traffic Management System, Microscopic Traffic Simulation, Real-time Capability

1 Motivation

Traffic management systems are essential for operating sophisticated road networks in metropolitan areas. They combine on-line measured data from several data sources in the field to capture the current traffic state. The processed information supports the operator in order to recognize incidents and to fight congestion by

applying one of the predefined strategies influencing the system's actuated elements like traffic signals, dynamic route advisory displays or variable speed signs. The challenge in that process is how to choose the best suiting strategy for the current situation, which is usually based on the experience of the operator. A taken decision can work out in the right way and clear the situation, or it can be wrong and even make it worse. The problem is the lack of possibilities to evaluate a strategy before applying it in the field. If at all, those strategies are only optimized one-time during the planning process of the management system by using a specific situation from the past to fit a set of parameters. When afterwards the detected and the underlying situation differ from each other the applied predefined strategy was implicitly not the optimal choice.

Focus of this work is to use the already existing on-line traffic data from a traffic management system for replicating the current traffic situation simultaneously in a traffic simulation. With this simulation it becomes possible to examine the effects of the system's different intervention strategies before applying them in the field. The operator can run a rapid benchmark to compare his available options on criteria e.g. optimizing vehicles' delay times, tailbacks, the number of stops or vehicle emissions and afterwards can choose the best one. Even immediate and automatic adaption of existing strategies or autonomous testing of new strategies like [Oer12a, Oer12b] becomes feasible. The base for this research is the traffic management system VAMOS [Kri11, Cha12] in the city of Dresden, mainly developed by the Chair of Traffic Control and Process Automatisatation at the Technische Universität Dresden and the microscopic simulation suite SUMO [Beh11, Ins12], essentially developed by the Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center.

2 Real-time simulation system

2.1 System setup and requirements

For a simulative real-time replication of the current traffic situation the VAMOS management system must be connected with a server hosting the simulation program SUMO. On this SUMO simulation server the accurate model of the existing road network, the entire other infrastructure and the available management strategies must be modelled. Then the simulation needs to be permanently supplied with current traffic data from the VAMOS data base which is fundamental for achieving the objective of real-time capability. Due to this a special I/O data interface must be applied representing one of the project's main challenges. This setup consists of the three components VAMOS management system, SUMO simulation suite and I/O data interface and is depicted in figure 1. It will be specified in the following chapters.

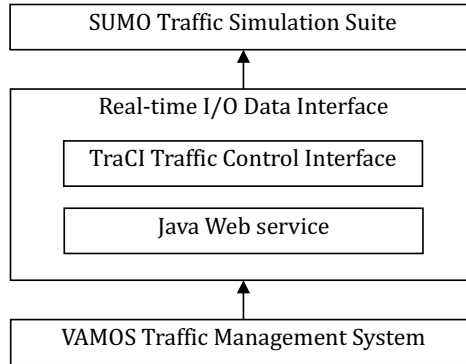


Figure 1: Setup for the real-time simulation with its three major components.

Obviously, there are some more requirements than the just mentioned I/O data interface to create a platform for real-time evaluation. Not only the I/O data interface needs to be real-time capable but the whole chain from measuring the traffic data in the field, storing it in the VAMOS data base, importing it to SUMO and running the simulation. In this context real-time capability means to keep the latency below 5 minutes which is an ambitious objective. The simulation itself must be able to handle several instances of one scenario, running at the same time for the comparison of the available strategies.

2.2 The traffic management system – VAMOS

The traffic management system VAMOS [Kri11] is the technical base for the whole setup. It is founded on a mathematical model of the road network of the city of Dresden which contains about 7.000 nodes, 20.000 edges and at least 40.000 lanes. Data from various single and double induction loops, traffic eye universals, traffic signal controllers, floating cars (500 taxis), parking area detection and on-line cameras are gathered, processed and stored in various databases. The operator has the opportunity to analyse that data and set e.g. traffic signals or dynamic route advisory displays. Some fixed strategies are proposed by the system e.g. for an alternative routing when the motorway is closed, but they are not evaluated depending on the current traffic state. Figure 2 shows the VAMOS management center of the city of Dresden which is an exact duplicate of the management center at the Technische Universität Dresden. It acts as a client, receives the same traffic data, processes the same information and has implemented exactly the same intervention strategies but has no access to the system's actuating elements. All available information like the traffic states on the road segments, the positions of the detection infrastructure or special POIs are shown on different layers. Further information about the VAMOS traffic management system is available on-line [Cha12].



Figure 2: VAMOS is fully integrated into the local traffic management center (Dresden, Germany).

2.3 Simulation base SUMO

For modelling and simulation the open source simulation suite SUMO (Simulation or Urban Mobility) [Beh11] is used. SUMO is a microscopic traffic simulator which includes network import e.g. from Open Street Map, VISUM, VISSIM or other sources, demand modelling and routing utilities supporting e.g. origin destination matrices or traffic counts. That means the import of the existing VAMOS road network model and of the continuously measured flows is possible. Each vehicle has a route which can be redirected during the simulation, a type to differentiate between e.g. cars, trucks, buses or trams and a set of other parameters to specify further characteristics. The parameters for the driving behaviour are required as input for the car-following model developed by Stefan Krauß which updates the position and the velocity of each vehicle in every second. The strength of SUMO is its high performance simulation which is usable for only few intersections or even for an extensive road network like in the city of Dresden. This is important for the required real-time feasibility of the system's setup. SUMO allows generating various outputs for a simulation run to compare numbers like delays, tailbacks, emissions and noise. These results are finally utilized to suggest the most efficient strategy to the operator in the traffic management center. The user interface of SUMO is depicted in figure 3, additional information about SUMO and the software itself can be downloaded [Ins12].

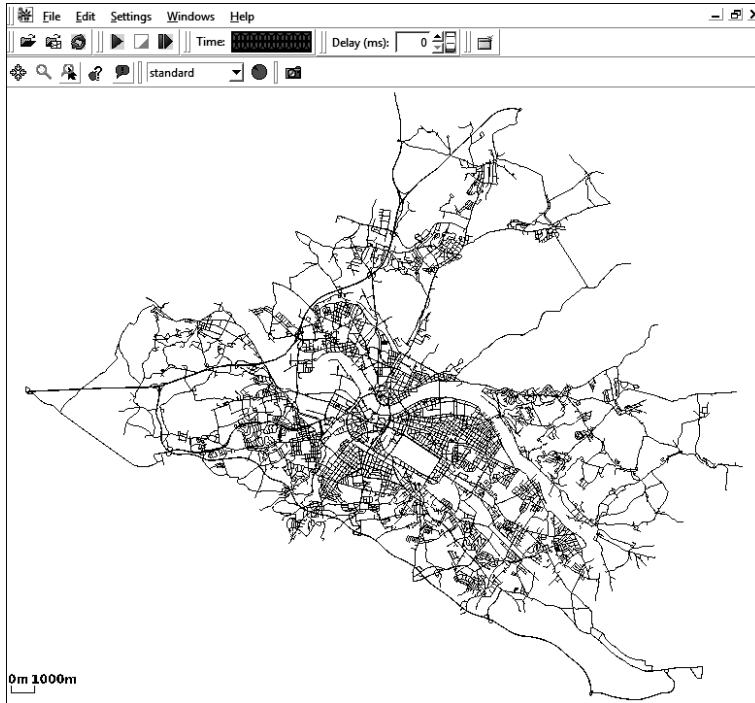


Figure 3: Microscopic traffic simulation of entire cities with SUMO (Dresden, Germany).

2.4 Real-time I/O data interface

A special real-time I/O data interface is applied to pass the gathered traffic data from the VAMOS data base to the SUMO simulation. It consists of a Java Web service and an interactive simulation interface, so called TraCI (Traffic Control Interface). TraCI is already a tool in the SUMO simulation suite and gives access to a running simulation. On one hand current values of all objects in the simulation like vehicles, traffic signals or detectors are retrievable with TraCI, on the other hand it is also possible to change the states of these objects, which is important for the assessment of the available management strategies. With this function new vehicles can be imported to a running simulation as soon as they appear in the VAMOS data base e.g. when they were detected by an induction loop. To test the different strategies, all belonging interventions like modified traffic signal programs can be passed in the same manner. The data export from VAMOS via TraCI to SUMO is handled by the mentioned Java Web service. It was newly implemented to pull the stored traffic data from the VAMOS data base and to push it to TraCI for interacting with the simulation.

3 First use cases

3.1 Basic conditions and state of work

So far the concept is generally implemented but still not finished. All three components of the chain are connected with each other and the traffic data from the VAMOS management system can be passed to the SUMO simulation. The preliminary exchanged data are traffic signal states, public transport telegrams and vehicle counts. They are available for numerous signalized intersections, tram stops and counting points distributed all over the city. These data are aggregated and exported to data files which are parsed by the Java Web service. This intermediate step of export will be omitted in the future and replaced by straight database access but is still necessary for the improvement of the I/O data interface. In the following passages two first uses cases will be presented. They demonstrate the opportunity of system's setup on the whole and show the benefits of assessing some available intervention strategies.

3.2 Assessment of traffic signal coordination interventions towards traffic quality

In a first realistic simulation [Arl12] an important arterial in Dresden with length about 10 kilometres was modelled. The model contains 15 traffic adapted signals with the opportunity to prioritize the public transport. In conventional simulations the entire control logic of all traffic signals needs to be implemented which is very time-consuming and difficult to calibrate in real-time. Therefor another approach is chosen, here the VAMOS management system can pass the real signal states directly one-by-one to the running SUMO simulation. The benefit of that method is that the simulated and the real behaviour of the signal controllers in the field are equivalent. By using the online data from local detectors like double induction loops or traffic eye universals the traffic volume and the individual traffic composition can directly be passed into the simulation.

With a powerful I/O Interface various information about every part of the simulation e.g. vehicles, edges and lanes for every time period are available. The opportunity to detect congestions and traffic jams in front of traffic lights is part of an analytical process by using different kinds of filters.

3.3 Assessment of public transport prioritisation interventions towards emissions

In a second realistic simulation [Rei12] a single intersection was modelled and used to pass traffic demands and signal states from VAMOS to SUMO. In that case various

kinds of emissions are calculated in real-time, depicted in figure 4. Measuring emissions is a true challenge; therefore it is very helpful to have a simulation-based assessment in order to choose the best suiting signal program to reduce these emissions. To increase the accuracy of the computed emission values double induction loops are used to get the current amount and the exact composition of the vehicles at a specific time. An algorithm decides which emission class fits the best to the recognized vehicle. This is done with help of the Handbook of Emission Factors for Road Transport (HBEFA).

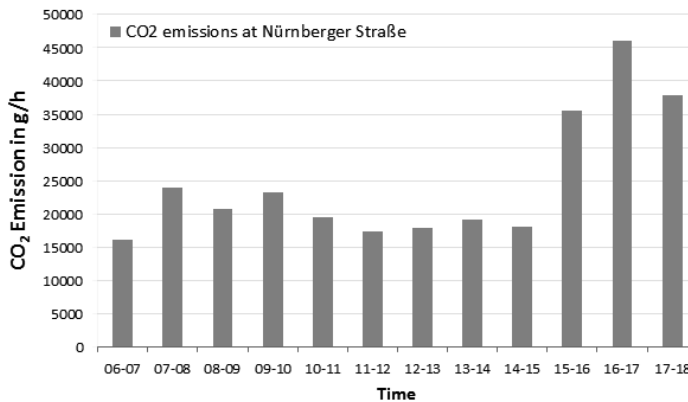


Figure 4: CO2 emissions for a specific road computed by SUMO.

4 Conclusion

In this paper a real-time simulation system is presented which makes it possible to first assess available intervention strategies of a traffic management system before setting them in the field. Thereby different strategies can be compared for a current traffic situation and the best suitable one can be suggested. This information supports the operator in the management center; it helps to avoid wrong decisions, and it can fight congestion efficiently. For that rapid benchmarking of the different strategies the simulation suite SUMO is connected with the VAMOS traffic management system via a special real-time I/O data interface. The gathered on-line traffic states are matched to the imported road network and the simulation is executed. As a result numerous output values e.g. delays, congestions, emissions and noise are offered for selecting an appropriate strategy. The two presented use cases of interventions towards traffic signalling and public transport prioritisation demonstrate the feasibility of this concept. After these first promising results the implementation of the described real-time simulation system will be continued to evaluate all available intervention strategies and to extend the VAMOS traffic management system by this valuable simulation feature in the future.

References

- [Arl12] A. ARLT: *Realitätsnahe Simulation des Verkehrsflusses auf der Süd-West-Umfahrung in Dresden mit SUMO unter Berücksichtigung des MIV und des ÖPNV*. Student research project report, Technische Universität Dresden, Germany, 2012.
- [Beh11] M. BEHRISCH, L. BIEKER, J. ERDMANN, and D. KRAJZEWICZ: "SUMO – Simulation of Urban MObility: An Overview". In: *Proceedings of SIMUL 2011: The Third International Conference on Advances in System Simulation*. Ed by IARIA. Barcelona, Spain, Oct. 23–29, 2011, pp. 63–68. ISBN: 978-1-61208-169-4.
- [Kri11] J. KRIMMLING, R. FRANKE, R. ENGELMANN, and M. KÖRNER: „Erfahrungen mit dem vollautomatischen baulastträgerübergreifenden Betrieb der Dynamischen Wegweisungskomponente im Operativen Straßenverkehrsmanagementsystem VAMOS". In: *HEUREKA 2011 – Optimierung in Verkehr und Transport*. Stuttgart, Germany, Mar. 16–17, 2011.
- [Oer12a] R. OERTEL and P. WAGNER: "Delay-time actuated traffic signal control for an isolated intersection". In: *Proceedings Transportation Research Board – 90th Annual Meeting*. Washington, D.C., USA, Jan. 23–27, 2011.
- [Oer12b] R. OERTEL, P. WAGNER, J. KRIMMLING, and M. KÖRNER: "Verlustzeitbasierte LSA-Steuerung eines Einzelknotens". In: *Straßenverkehrstechnik* 55.9 (2011), pp. 561–568.
- [Rei12] M. REICHE: *Vorher-Nachher-Analyse der Emissionsbelastung am Knotenpunkt Nürnberger Platz im Rahmen der ÖPNV-Bevorrechtigung des NSV-Projektes*. Student research project report, Technische Universität Dresden, Germany, 2012.
- [Ins12] INSTITUTE OF TRANSPORTATION SYSTEMS, GERMAN AEROSPACE CENTER: *SUMO - Simulation of Urban Mobility*. Berlin, Germany, 2012. URL: <http://sumo.sf.net>. Accessed Aug. 29, 2012.
- [Cha12] CHAIR OF TRAFFIC CONTROL AND PROCESS AUTOMATISATION, TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN: *VAMOS – Verkehrs-Analyse-, -Management- und -Optimierungs-System*. Germany, 2012. URL: <http://www.vamosportal.de>. Accessed Aug. 29, 2012.

Corresponding author: Mario Krumnow, Technische Universität Dresden, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, phone: +49 351 463-36780, e-mail: mario.krumnow@tu-dresden.de

Mobile Services of Social Networks and their Potential for Traffic Management and Real Time Traffic Information

Andreas Kretschmer, Sven Fröhlich, Christian Gassel
Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22–26, 2012, paper ID EU-0610.

Abstract

In the last years social networks became important platforms for communication and collaboration. Along with the increase of capability and availability of both, mobile devices and wireless communication, social networks are increasingly used on the way. Until now mobile devices and location based services have been used to provide passenger information and offers of public transport agencies. Furthermore they are used to provide information about traffic flow and disruptions in road traffic as an additional service of a city or a region. Manufacturers of mobile or built-in navigation systems gather traffic data on their own and provide an overwhelming offer of information to their users. Nowadays social networks contribute to the people's increasing interconnectedness. Mobile devices as mobile or smart phones integrate applications for participation in several social networks. The heavy use of such client software shows people's need for communication. Furthermore, applications allow the integration of complex requests and communication to servers into simple and comfortable human machine interfaces. Thus, the combination of capabilities of mobile devices and services with social applications and networks appears as a powerful addition for data acquisition, traffic analysis and information as well as people's real time feedback.

Keywords: Mobility, Crowdsourcing, Social Sensing, Mobile Social Network, Real Time Traveller Information, Real Time Traffic Information, Traffic Management

1 Status quo

Most traffic information services are already accessible for mobile devices, either by using common websites or specific applications. Predominantly, information is delivered about traffic conditions (road traffic flow, construction works, plan variances in public transport and further more) taking hardly into account user-specific requirements.

Current approaches taken by public transport companies for instance, deal with the categorisation of disruptions in public transport. One basic principle takes into account the duration and spatial scope of disruptions. The longer a disruption and its consequences take or the wider the affected area is, the more importance is attached to the provision of travel information (mainly using collective passenger information systems). This principle was designed to improve traveller information but it is finally geared to the removal of disruption causes and the containment of disruption consequences from an operational point of view.

In fact, passengers are – independent from mode of transport – mainly interested in effects on their personal travel route which currently takes place or is planned for the future (according to the example given the very near future). From this point of view only the affected route, alternative offers/possibilities and maybe the time deviations are relevant for the passenger. Furthermore the required travel information depends on the intention of travelling. Examples for such cases are “reaching a certain address” (appointment), “reaching a destination with a certain offer” (products, functionalities or services), “meet wherever you are” (meet other people) or combinations of them.

In terms of traffic management nowadays first of all conventional detectors are used to acquire traffic data. This data is typically processed within a traffic management centre which furthermore controls several subsystems (to accomplish switching actuators to the status regarding to pre-defined measurements or comprehensive strategies). An important part of the systems is based on previous mono-modal management control for only one mode of transport and has therefore rarely been linked to other control systems afterwards. Only newer management systems are partially designed as intermodal systems from the scratch.

Manufacturers of navigation systems or software started gathering traffic data of their users some years ago. Nevertheless the resulting information is often not feasible for public traffic management authorities for several reasons (for instance it might be provided for users of a specific product or service only). Furthermore these navigation systems focus on private motorised road traffic and are therefore not sufficient for comprehensive mobility management. Until today there are very poor possibilities to synchronise traffic information provided by public authorities and

offered by private service providers (for instance route guidance). As a result it is hardly possible to assess quality of public traffic information or to reflect acceptance and compliance to traffic management measures by the traffic participants.

2 Approach

2.1 Potentials and methods for data acquisition and processing

Mobile devices as personal assistants in combination with social networks have the potential to integrate intention of travelling according to the underlying social processes and might be able to distinguish between several use cases. The Technische Universität Dresden (TUD) developed an approach which links traffic telematics with social networks. The system architecture allows advantages for both – social network users and traffic management systems [Fro11].

The challenge on gaining user data recorded by the sensors on their mobile devices is to motivate the users to share their information. In the web 2.0 era of the internet there are different approaches to get information and content created by users. The approach described in this paper is to use the methods of Crowdsourcing and Social Sensing.

2.2 Crowdsourcing and social sensing

Crowdsourcing (CS) is a process, where content is created by a large number of internet users. Two main different types of CS can be distinguished. In the first one, content is created in form of blogs, wikis, music, videos, etc. by participants of a community and is then shared with the community on the net [Hub08]. In a second type, CS is used as a business model. Tasks and processes are outsourced to the internet by enterprises, universities and governments (eGovernment) to be solved by a network of knowledge experts [Lop10].

Social Sensing is defined as a process using sensors embedded in mobile devices to gain information about people and their activities [Mil08]. Rosi et. al. expand this definition and consider any source of information as Social Sensor. Each of these sensors can be identified in modern social networking and web tools and expresses some situation or fact about users and their social environment. Using social networks for accessing the preferences and properties of individuals and groups potentially allows acquiring up-to-date, richly annotated contextual data from users' everyday use of services [Ros11].

A growing penetration of society with mobile minicomputers like smartphones and tablet-PCs and an increasing use of mobile social networks [Moh11] (also among

participants in transportation processes) is the basis for the approach described in this paper. People using social networks can be considered to be the crowd creating the content (Crowdsourcing). Using the sensors of the mobile devices and the users shared data in the social networks (Social Sensing) can be seen as a new source of traffic data. This new kind of traffic data will not only contain data about the state of traffic for individual as for public transportation. Furthermore, traffic metadata (such as purpose of trip) and traffic information which are deeply interlinked with social processes can be gained.

2.3 Benefits: a win-win-situation for both – for traffic participants as well as for actors of traffic and transport management

The increasing equipment of traffic participants with mobile devices and mobile access to social networks also results in new opportunities for traffic and transport management. Especially (private) traffic management might use the “floating user data” as additional input without installing new detectors or expanding an existing (dedicated) information infrastructure. Acquired user data is for at least four reasons suitable for data completion of conventional detector data: Firstly, it refers to points in time instead of points on routes (similar to Floating Car Data – FCD, closing spatial gaps, improving refresh periods and accuracy of data). Secondly, it might be used in context to the reason for travelling (social networks). Thirdly, it acts as multimodal detector which covers all modes of transport (even the several modes of private traffic, e.g. cyclists and pedestrians). Finally, compared to current states of traffic management actuators (including traffic information such as variable message signs) it provides information about acceptance and compliance of management measures by the traffic participants. Having made data feasible in several processes (e.g. automatic transport mode detection, similar to other projects [Cam08]) traffic management is able to complement knowledge about traffic conditions.

Users take benefit from personalised travel data (using current public transport and road data) as well as traffic-related data of their social community. Coupling processed data of conventional traffic management systems with input from social networks allows personalised provision of Real Time Traffic and Real Time Traveller Information reaching better information coverage for transport systems and higher quality for personalised services with a high degree of context-awareness.

Recommendations by individual and personalised route guidance services may differ. If communicated to the users who might wonder about otherwise provided collective information, it might lead to an increased and ongoing use of personalised services.

Advantage for traffic management is that traffic congestions in many cases could be avoided (or a better level of service achieved), even if only a small part of the total

number of traffic participants followed the recommended alternative route (for instance 10 %).

Service users benefit directly, because they receive comprehensive information very early and are for instance able to circumnavigate a congestion being part of the 10 % taking the bypass. Moreover, all traffic participants would benefit, if a traffic congestion firstly taken for sure (e.g. within the rush hour) could be avoided, because only 90 % of traffic participants remain for passing the bottleneck. Based on the close communication, service users at least exactly know about duration and dimension of traffic congestions. Furthermore, users might be interested to change mode of transport before starting their way to an event at all or decide to switch by the help of park-and-ride stations on the way.

2.4 Towards mobility management

Summarised conventional traffic management can be supported whilst its development to comprehensive mobility management by the help of new services based on Crowdsourcing and Social Sensing. Main advantages result from combining information about all modes of transport regarding e-mobility and car-sharing systems. The personal interests and intentions of traffic participants can be considered much better than nowadays. Nevertheless the sum of all demands can be projected to the capacities of the overall traffic and transport system of a city/region or defined area. Gathering data and information allows assessment and reconfiguration of pre-defined traffic and transport strategies. For the first time this information could be gathered in an relevant breadth covering a whole management area, comprehensive for all modes of transport and in context to the reasons for moving.

Furthermore early detection of forthcoming bottlenecks and prognosis in general might reach a new quality of service. The optimisation by traffic guidance systems considers personal needs of participants (daily routes, appointments, destinations as well as intention for travelling), comprises forecast of traffic conditions, roadwork or events and gives suitable advice to fulfil people's needs. Moreover, highly integrated traffic guidance might no longer depend on a certain destination only but for instance solely on attendees and timely fashion of an appointment or the purpose of travelling.

3 Proof of concept

3.1 Test application

The Technische Universität Dresden (TUD) developed a prototype of an application to test the approach described above. The prototype consists of a user client, which is

an app for Android smartphones and a back-end server java application.

Users can locate themselves on GoogleMaps using the smartphone-app. They can get routing information which takes the current traffic information and the schedules of public transportation into account and they can invite friends of social networks such as Facebook to a meeting. Users attending on a meeting will get detailed information about their friend's routes and trip details such as estimated arrival time on the meeting point and used mode of transportation. To obtain this information, users send their own GPS-position to the backend server every 5 to 30 seconds.

The position information is also used to perform a rerouting once a user's position is deviating from the suggested route. Taking into account the current situation of traffic, users will always get the optimal routing from their current positions to their destinations desired.

Furthermore, the periodic position information of users are collected anonymously and stored in a database in form of a dataset. Among other information a dataset contains the user's GPS-position, the travel speed and the mode of transportation (pedestrian, bicycle, private motorised transportation and public transport). The datasets can be used for estimation and prediction of traffic conditions by Dresden's traffic management systems VAMOS [Kri12].

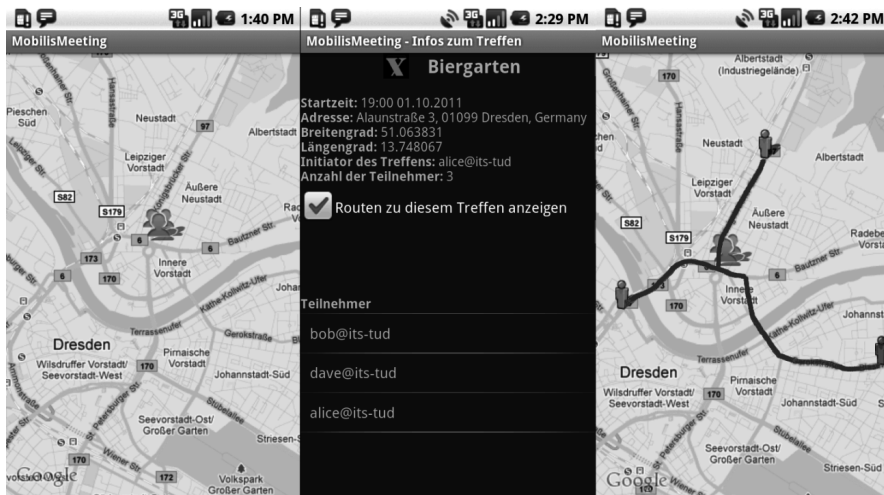


Figure 1: Different views of the user interface of the developed app (map by GoogleMaps).

Figure 1 shows the user interface of the developed test application. On the left a created meeting is shown, while the details for this meeting can be seen in the middle. On the right the three attendees are displayed, including their suggested routes and their present positions.

4 Results

The prototype has been tested over a period of four weeks. Within this time, users who are friends in real life as well as in a social network, have collected 125 test series in their daily life, using the application for meetings with each other or simply as a routing system. Six of the datasets contained pedestrian data, 44 sets have been recorded using a bicycle, 54 sets contain data recorded while driving in a car and 13 datasets were recorded during the use of public transportation. For eight datasets the mode of transportation has been unknown.

All datasets have been plotted to a map to analyse the quality of the recorded traces. An intense analysis has been carried out for datasets recorded during private motorised transportation and during the use of public transportation systems, since they are most interesting for conventional traffic management. The suitability of the collected data for purposes of traffic management has been tested depending on the mode of transportation.

4.1 Private motorised transportation

Dresden's traffic management system VAMOS (operated by the City of Dresden and supported by the TUD) estimates the traffic conditions partly based on an algorithm which analyses FCD delivered by more than 500 Taxis [Koe12]. The same algorithm has been applied to the recorded data to perform automated analyses. The results of these analyses have been validated by the person collecting the data and, if possible, by the results of other sensors which are used as conventional detectors for traffic management. With the developed application, FCD including the travel speed and the travel time can be gained.

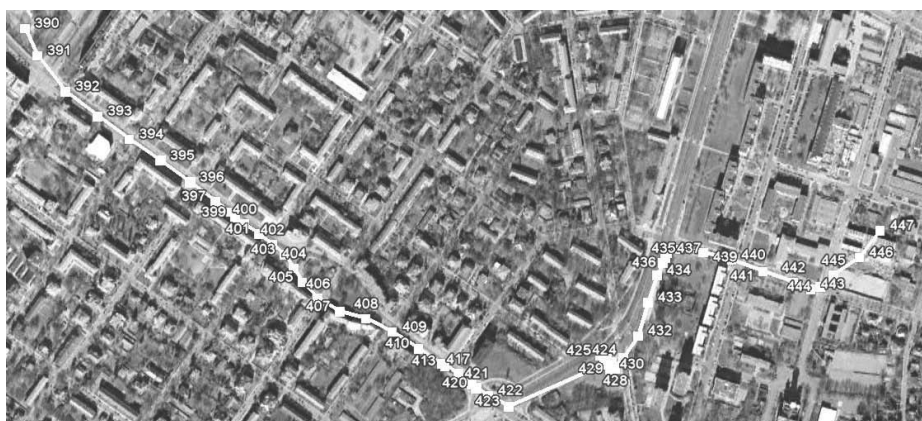


Figure 2: GPS-Positions of private motorised traffic (aerial picture by GoogleEarth).

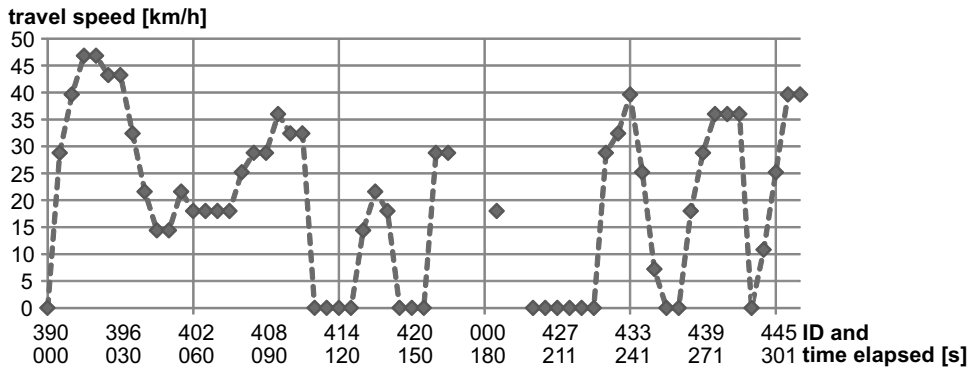


Figure 3: Speed-time-graph according to recorded GPS-positions and IDs.

Figure 2 shows a route of a car recorded by the developed application using an Android smartphone. The different GPS-positions are marked with an identifier (ID). Using the same IDs, a speed-time-graph has been plotted and is shown in figure 3. The speed information has been delivered by the GPS-sensor integrated in the smartphone. The time span between two consecutive data sets, including position, speed and mode of transport, is five seconds. Characteristics of this ride such as stops at traffic lights (including their duration) and speed limits are reflected in the data.

4.2 Public transportation

Due to the absence of an automated algorithm, the analyses have been carried out manually. Using the schedule of public transportation, the knowledge of the local public transportation system and the plotted traces the quality has been assessed. It could be shown that the intermodal approach is delivering valuable data.

For the dataset shown in figure 4 the following times could be derived (from left to right):

- access time (walking, 3 min, x-mark),
- waiting time (bus stop, 2 min, o-mark),
- travel time (city bus, 6 min, triangle-mark),
- waiting time whilst changing (bus/tram stop, 5 min, o-mark),
- travel time (tram, 2 min, square-mark) and
- leaving time (walking, 4 min, x-mark).

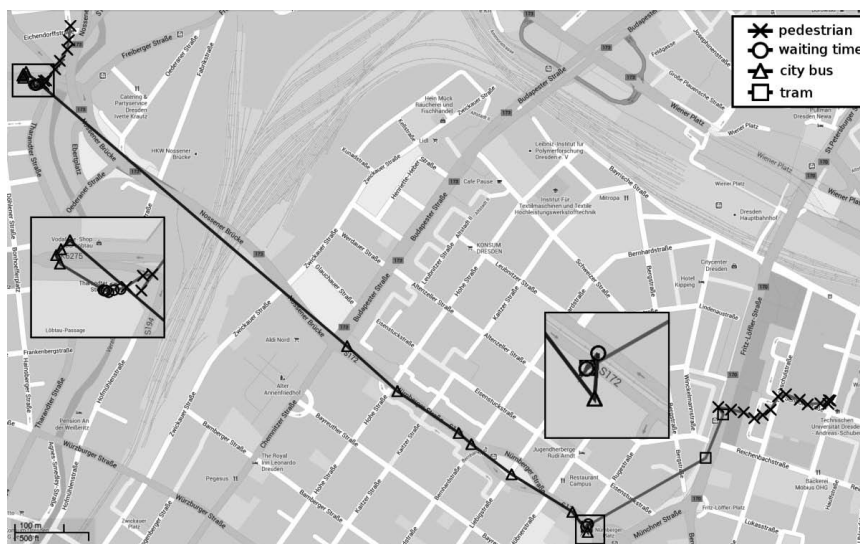


Figure 4: Example of test series in public transportation including switches to other mode of transport (map by GoogleMaps).

Overall, the results of this analysis are very positive. 95 of the 125 test series are fully and seven series partly usable for traffic management. Only 23 test series turned out to be unusable which has its main reasons in faulty inputs by the test users, the loss of GPS-signal or a disconnection between the mobile device and the backend server. With an enhanced user-interface and further software adaptations a higher percentage of test series might be usable in the future.

5 Conclusion and further prospects

Within the project described an application for mobile devices has been developed and tested which supports the acquisition of traffic data. More than 75 % of gathered test series had a sufficient quality and were compromised for the estimation and prediction of traffic flow within Dresden. Furthermore a new information path was used to provide personalised real time travel information via mobile devices to the traffic participants. According to the positive reactions of the test users and the benefit of additional floating traffic data for traffic management one of the next steps should be a field operational test with a major number of users. In particular, the possibility of feedback on quality of travel information, on consumer satisfaction regarding traffic management measures as well as on information about users requests like “most wanted destinations” let expect new and important findings.

References

- [Fro11] S. FRÖHLICH: *Gewinnung erweiterter Verkehrsinformationen auf der Basis mobiler Dienste für soziale Netzwerke*. Master Thesis, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [Hub08] B. A. HUBERMAN: "Crowdsourcing and Attention". In: *Computer* 41.11 (2008), pp. 103–105.
- [Lop10] M. LOPEZ, M. VUKOVIC, and J. LAREDO: "PeopleCloud Services for Enterprise Crowdsourcing". In: *Proceedings 2010 IEEE International Conference on Services Computing (SCC)*. Miami, USA, Jul. 5–10, 2010, pp. 538–545. DOI: 10.1109/SCC.2010.74. ISBN: 978-1-4244-8147-7.
- [Mil08] E. MILUZZO, N. D. LANE, K. FODOR, R. PETERSON, H. LU, M. MUSOLESI, S. B. EISENMAN, X. ZHENG, and A. T. CAMPBELL: "Sensing meets mobile social networks: the design, implementation and evaluation of the CenceMe application". In: *Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems*. Raleigh, NC, USA, Nov. 4–7, 2008, pp. 337–350. DOI: 10.1145/1460412.1460445.
- [Ros11] A. ROSI, M. MAMEI, F. ZAMBONELLI, S. DOBSON, G. STEVENSON, and J. YE: "Social sensors and pervasive services: Approaches and perspectives". In: *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*. Seattle, USA, Mar. 21–25, 2011, pp. 525–530. DOI: 10.1109/PERCOMW.2011.5766946.
- [Moh11] N. MOHR and A.-K. SAUTHOFF-BLOCH: *Mobile Web Watch 2011, Deutschland, Österreich, Schweiz: Die Chancen der mobilen Evolution*. Technical Report, Accenture, 2011. URL: http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/Local_Germany/PDF/Accenture-Studie-Mobile-Web-Watch-2011.pdf.
- [Cam08] A. T. CAMPBELL, S. B. EISENMAN, N. D. LANE, E. MILUZZO, R. A. PETERSON, H. LU, X. ZHENG, M. MUSOLESI, K. FODOR, and G.-S. AHN: "The Rise of People-Centric Sensing". In: *IEEE Internet Computing* 12.4 (2008), pp. 12–21.
- [Kri12] J. KRIMMLING and A. KRETSCHMER: "The traffic management system VAMOS – from research to regular operation". In: *19th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Vienna, Austria, Oct. 22–26, 2012, paper ID EU-00421.
- [Koe12] M. KÖRNER and R. ENGELMANN: "3x benefit by local competence – direct use of Taxi-FCD to generate road traffic messages". In: *19th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Vienna, Austria, Oct. 22–26, 2012, paper ID EU-00015.

Corresponding author: Sven Fröhlich, Technische Universität Dresden, "Friedrich List" Faculty of Transport and Traffic Sciences, phone: +49 351 463-36718, e-mail: sven.froehlich@tu-dresden.de

Pilotierung eines Assistenzsystems zur kraftstoffsparenden Fahrweise im SPNV – Erfahrungen aus Vorbereitung, Durchführung und Nachweisführung

Thomas Albrecht¹, Matthias Pathe²

¹ Technische Universität Dresden

² Interautomation Deutschland GmbH, Berlin

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht in: EI-Eisenbahningenieur 63 (2012) 9, S. 66–70.

Abstract

Driver Advisory Systems (DAS) are a shortterm solution to reduce fuel consumption of diesel-hauled trains. The system “InLine-FAS” was successfully tested on the regional network of Veolia Sachsen-Anhalt GmbH. The article describes the data requirements for such a test and the operational setting under which the system was applied. The pilot was carried out without the need to access interfaces of the vehicle control system using a Smartphone with integrated GPS positioning module. The obtained saving of approximately 5 % measured at the fuel station has convinced the railway undertaking to use the DAS in regular operation as a module of their existing traffic management and control system.

1 Motivation

Die Preise für Dieselkraftstoff haben sich laut statistischem Bundesamt in den letzten zwölf Jahren mehr als verdoppelt (Abbildung 1). Eisenbahnverkehrsunternehmen sind durch den naturgemäß hohen Verbrauch drastisch von den Preissteigerungen betroffen, insbesondere im verbrauchsintensiven Schienenpersonennahverkehr (SPNV). Eine der Möglichkeiten, den Kraftstoffverbrauch zu senken, besteht in der Optimierung der Fahrweise der Züge [Alb11; UIC12]. Mit Hilfe von Fahrerassistenzfunktionen als Bestandteil rechnergestützter Betriebsleitsysteme können Triebfahrzeugführer bei der Realisierung kraftstoffsparender Fahrweisen unterstützt werden. In diesem Beitrag wird dargelegt, welche Voraussetzungen für den Einsatz solcher Assistenzsysteme gegeben sein sollten und wie anhand eines zeitlich begrenzten Pilotbetriebs der Nachweis über die ökonomischen Wirkungen eines solchen Assistenzsystems erfolgen kann. Dies erfolgt am Beispiel des durch die Interautomation Deutschland

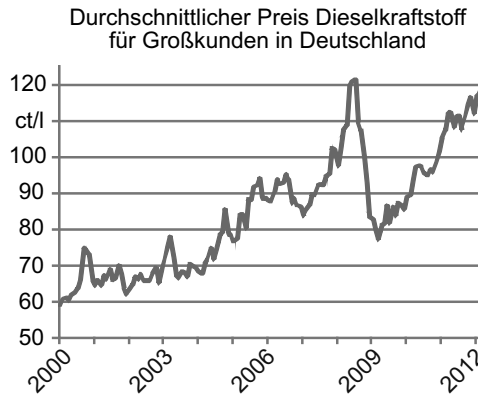


Abbildung 1: Durchschnittlicher Dieselpreis für Großkunden in Deutschland [Sta12].

GmbH und die Technische Universität Dresden entwickelten Fahrerassistenzsystems „InLine-FAS“ und dessen Erprobung bei der Veolia-Verkehr Sachsen-Anhalt GmbH (VVSA GmbH).

2 Theoretischer Hintergrund Fahrerassistenz

2.1 Optimale Fahrt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halten

Aus der Theorie der optimalen Steuerung lässt sich ableiten, dass bei Fahrten im Regionalverkehr nur die Fahrregime:

- Antrieb mit maximal möglicher Beschleunigung,
- Beharrungsfahrt mit konstanter Geschwindigkeit,
- Ausrollen (Auslauf) und
- Bremsen mit maximal möglicher Bremsverzögerung

angewandt werden sollen. Details und verschiedene Literaturquellen finden sich in [Alb11]. In Abhängigkeit der Fahrplanlage können Reserven im Fahrplan z. B. zum Ausrollen oder Beharren unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit genutzt werden, was zur Einsparung von Kraftstoff im Vergleich zur zeitoptimalen Fahrt (Spitzfahrt) führt (Abbildung 2).

In der Literatur ist beschrieben [How93; Yee04], dass auch Fahrregime wie Beschleunigen mit Teillast oder die sogenannte Sägezahnfahrt (Wechsel von Antrieb/Auslauf) unter bestimmten Randbedingungen optimal sein können. Für die Berücksichtigung dieser Regime muss das Wirkungsgradverhalten der Motoren bekannt sein. Im hier beschriebenen Pilotprojekt war dies nicht der Fall, daher wurde sich auf die oben angegebenen Regime beschränkt.

2.2 Optimale Fahrzeitenregelung entlang einer Linie

Die Verfügbarkeit von Fahrzeitreserve beeinflusst in hohem Maße den resultierenden Kraftstoffverbrauch (Abbildung 2). Im SPNV sind die Fahrzeitreserven auf einzelnen Abschnitten

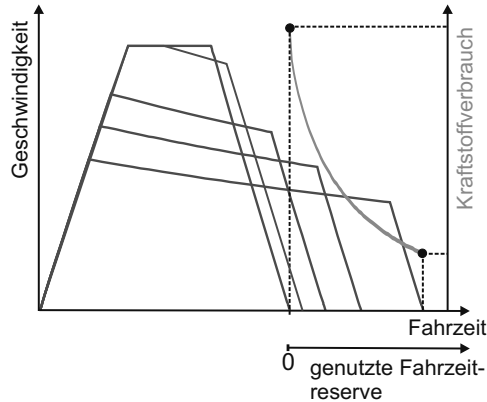


Abbildung 2: Geschwindigkeitsverläufe für unterschiedliche Fahrzeiten und dazugehörige Kraftstoffverbräuche (Prinzipiskizze).

teilweise sehr klein. Hier besteht schon bei Verspätungen im Bereich weniger Sekunden das Risiko, dass der nächste Unterwegshalt nur mit zeitoptimaler — und damit kraftstoffintensiver — Fahrweise pünktlich zu erreichen ist.

Aus praktischer Sicht ist die sekundengenaue pünktliche Ankunft nur an wenigen wichtigen Halten notwendig, i. d. R. sind das Endhalte, Halte mit intra- bzw. intermodalen Anschlüssen und Kreuzungspunkte. An dazwischen liegenden Haltepunkten sind Verspätungen nur für aussteigende Fahrgäste relevant. Abweichungen von weniger als 1 min in der Ankunftszeit werden durch die Fahrgäste nicht als kritisch wahrgenommen. Mit Hilfe einer sekundengenaue dynamischen Fahrzeitenregelung zwischen zwei wichtigen Halten kann bei geringfügigen Verspätungen die zeitoptimale (kürzeste) Fahrweise vermieden werden [Bin12].

Im Betrieb können Echtzeit-Randbedingungen die durch den Fahrplan gegebenen Randbedingungen überlagern. Treten z. B. auf eingleisigen Strecken Verspätungen auf, lässt sich durch Fahrzeitverlängerung eines pünktlichen zu kreuzenden Zuges weiteres Kraftstoffeinsparpotenzial erschließen [Bin12].

3 Vorbereitung des Pilotprojekts

3.1 Erfassung Streckendaten

Fahrweise müssen die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten, die gewöhnlichen Halteorte der Züge und die Streckenwiderstände (Neigungen, Bögen) bekannt sein. Da als Ortungsverfahren GPS zum Einsatz kommen sollte, mussten zunächst alle Streckenverläufe mit ihren geografischen Koordinaten erfasst werden, um später damit Entfernungen zu Punkten entlang der Strecke zu ermitteln.

Als Höchstgeschwindigkeiten waren nur die im Buchfahrplan und Verzeichnis der Langsamfahrstellen veröffentlichten Informationen bekannt. Im Regelbetrieb treten weitere qua-

sistatische Geschwindigkeitsbeschränkungen auf, wie z.B. Regelfahrwege mit reduzierter Geschwindigkeit, regelmäßige Einfahrt auf Halt zeigendes Signal und die daraus resultierenden Geschwindigkeitsbeschränkungen durch das System der Punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB) sowie betrieblich zulässige Geschwindigkeiten im Bereich von Bedarfshalten. Diese wurden während Messfahrten an Bord manuell erfasst. Für den Regelbetrieb wurde im Betriebsleitsystem die Möglichkeit geschaffen, diese Geschwindigkeitsprofile tagesaktuell anzupassen, z. B. bei temporären Langsamfahrstellen.

Insbesondere bei Bahnhofseinfahrten mit geringen Geschwindigkeiten ist die Kenntnis des genauen Halteorts von Bedeutung, da die zurückzulegende Distanz starke Auswirkungen auf die bis zum Halt verbleibende Fahrzeit haben kann. Die gewöhnlichen Haltepositionen wurden deshalb ebenfalls während der Messfahrten erfasst, genauso wie die Ausrichtung des Zuges am entsprechenden Halt an der H-Tafel (vorn) bzw. an den vorhandenen Zu- und Abgängen zum Bahnsteig.

Das Neigungsprofil von Strecken und der daraus resultierende Streckenwiderstand haben ebenfalls Einfluss auf die Fahrweise von Zügen, insbesondere während des Fahrregimes Auslauf. Für das Pilotprojekt wurde ein an der TU Dresden entwickeltes Verfahren erstmals erfolgreich eingesetzt, mit dem basierend auf kombinierten Luftdruck- und Positionsmessungen am fahrenden Zug das Neigungsprofil ermittelt werden kann [Tho11].

3.2 Aufbereitung Fahrplan

Der Fahrplan wird der VVSA GmbH minutengenau vom Aufgabenträger übergeben. Bei der Fahrplanung durch die DB Netz werden erfahrungsgemäß insbesondere beim vertakteten SPNV meist konstante Haltezeiten im Tagesverlauf angenommen. Aus diesem für die dynamische Fahrzeitenregelung zu groben Fahrplan mussten zunächst die wichtigen Halte extrahiert werden, an denen eine sekundengenaue Ankunft erfolgen soll.

Die Genauigkeit der Prognose der Verspätung bis zum nächsten wichtigen Halt einer Zugfahrt hängt von der Genauigkeit der Prognose der Haltezeiten an den Zwischenhalten ab. Hierfür wurden die vom Rechnergestützten Betriebsleitsystem (RBL) erfassten Haltezeiten automatisch, statistisch ausgewertet und für die dynamische Fahrzeitenregelung wurde ein festzulegendes Häufigkeitsquantil als Prognosewert hinterlegt.

Lücken ergaben sich bei Betriebshalten (z. B. zur Überholung oder Kreuzung von anderen Zügen), die zwar im Buchfahrplan, jedoch nicht im Fahrplanungssystem hinterlegt waren. Diese mussten zunächst manuell erfasst werden.

3.3 Fahrzeugdaten

Für die Fahrplanung durch die DB Netz AG müssen durch die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) Daten des sogenannten Anforderungsprofils für fahrdynamische Triebfahrzeugdaten bereitgestellt werden. Die darin enthaltenen Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramme können digitalisiert und für die Ermittlung der optimalen Fahrweise genutzt werden.



Abbildung 3: Aufbau in der Testphase: Das Smartphone im Vordergrund stellt das Kommunikationsmedium für das existierende RBL dar, das neben dem Tachometer angeordnete Smartphone mit „InLineFAS“ war während des Pilotprojekts zusätzlich im Einsatz.

Die in den Daten angegebenen Koeffizienten für den Fahrwiderstand spiegelten das Verhalten der Fahrzeuge während der Antriebsphase ausreichend wider. Bei den im Pilotprojekt genutzten Fahrzeugen vom Typ Lint wird das Fahrgetriebe beim Rollvorgang nicht ausgekuppelt. Für den dabei auftretenden und bremsend wirkenden Getriebewiderstand lagen keine Daten vor, so dass diese durch Parameterschätzung ermittelt und durch den Vergleich von gemessenen und simulierten Fahrverhalten validiert werden mussten.

4 Einsatzkonzept des Fahrerassistenzsystems

4.1 Technisch

Für das Pilotprojekt sollte eine von den Fahrzeugschnittstellen unabhängige Lösung geschaffen werden. Die Entscheidung fiel daher auf den Einsatz eines handelsüblichen Smartphones mit integriertem GPS-Empfänger. Dieses wurde im Führerraum im Blickfeld des Triebfahrzeugführers in einer Fahrzeughalterung installiert (Abbildung 3). Ausgaben erfolgten optisch über das Display bzw. akustisch über die im Smartphone integrierten Lautsprecher.

Während des Testbetriebs sollte möglichst keine Bedienung des Systems durch die Triebfahrzeugführer notwendig sein. Dazu wurde das Smartphone per UMTS/GPRS mit dem

RBL-Server der VVSA GmbH verbunden, um dort die über das bestehende System erfasste aktuelle Zugnummer des Fahrzeugs abzugreifen. Der kontinuierliche Betrieb des Displays und des GPS-Empfängers im Gerät machte eine Anbindung an die Bordenergieversorgung notwendig.

4.2 Betrieblich

Um eine hohe Akzeptanz durch die Triebfahrzeugführer zu gewährleisten und Ablenkungen durch das Gerät möglichst klein zu halten, wurde entschieden, grundsätzlich nur zwei verschiedene Empfehlungen an die Triebfahrzeugführer auszugeben: „Abfahrtszeit erreicht“ am Halt sowie „Auslauf“ während der Fahrt.

Auslaufempfehlungen wurden dabei nur gegeben, wenn die Geschwindigkeit am Ende des Auslaufvorgangs oberhalb einer durch den örtlichen Betriebsleiter festgelegten Mindestgeschwindigkeit liegt (hier 30 km/h). Dadurch sollen zu langsame Einfahrten in Bahnhofsbereiche vermieden werden, da diese zu lange Belegungszeiten von Fahrstraßen oder Bahnübergängen zur Folge hätten.

Die Art der Fahrzeitenregelung und die Größe der Toleranzen wurden den Triebfahrzeugführern mitgeteilt, damit diese die entstehenden Fahrplanabweichungen im Sekundenbereich nicht als kritische Verspätungen betrachten und damit die ermittelten Fahrempfehlungen akzeptieren.

Für die Pilotierung wurden zwei Kreuzungspunkte ausgewählt, an denen planmäßig ausschließlich EVU interne Kreuzungen erfolgen. Bei Verspätungen eines Zuges wurde dem entgegenkommenden Zug ein neuer Zielzeitpunkt zugewiesen, zu welchem die Ankunft am Kreuzungsbahnhof erfolgen sollte. Dabei wurden Fahrstraßenauflösungs- und -einstellzeiten im System hinterlegt.

4.3 Nachweisführung

Für den potenziellen Betreiber eines Fahrerassistenzsystems ist die monetäre Einsparung das entscheidende Einführungskriterium. Die Abrechnung des Kraftstoffes erfolgt an der Tankstelle. Tankvorgänge erfolgen an definierten Punkten innerhalb eines vollständigen Umlaufs, im Allgemeinen einmal täglich. Es wurde daher entschieden, den Kraftstoffverbrauch pro Umlauf mit und ohne Einsatz von InLineFAS zu vergleichen.

Bei einem solchen Vergleich müssen folgende Aspekte beachtet werden:

- Nebenverbraucher: Die Messung des aus dem Tank entnommenen Kraftstoffs schließt auch den Kraftstoff ein, der durch die Nebenverbraucher (Licht, Heizung, Klimaanlage) konsumiert wird. Deren Verbrauch variiert im Jahresverlauf erheblich.
- Einfluss der Mehrfachtraktion: Fahren Fahrzeuge mit Assistenzsystem als erstes Fahrzeug in der Mehrfachtraktion, so beeinflusst dies auch den Kraftstoffverbrauch aller gekuppelter Triebwagen. Fahren InLineFAS-Fahrzeuge nicht als erstes Fahrzeug im Zug, kann das System auf der konkreten Fahrt nicht genutzt werden.

- Einfluss des konkreten Fahrzeugs: Aus der beim Betreiber vorliegenden Analyse des Jahresverbrauchs der einzelnen Fahrzeuge wurde deutlich, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen gleicher Baureihe bestehen.

Da auch die Fahrzeiten und betrieblichen Bedingungen (Anschlüsse, etc.) vergleichbar sein sollten, wurde folgendes Nachweiskonzept verfolgt:

Auf drei Fahrzeugen (2 x Lint 41, 1 x Lint 27) wurde jeweils in beiden Führerräumen ein Smartphone mit der Software InLineFAS fest installiert. Die ausgerüsteten Fahrzeuge verkehrten auf Umläufen im Regelbetrieb vom 10. November bis 10. Dezember 2011. Die dabei gemessenen Verbräuche dienen als Referenz für den Mit-Fall. Die Umläufe aller anderen Fahrzeuge dienen als Referenz für den Ohne-Fall. Umläufe, die aufgrund betrieblicher oder technischer Gründe modifiziert werden mussten oder bei denen die Betankung zu anderen als den üblichen Zeiten erfolgte, wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen. Das Thema der Mehrfachtraktion wurde vernachlässigt, prinzipiell fallen daher gemessene Unterschiede zu niedrig aus.

Die VVSA GmbH betreibt vier verschiedene Umlaufpläne (Mo-Do, Fr, Sa, So), einige Freitag-Umläufe entsprechen den Umläufen Montag bis Donnerstag und wurden zur Vergrößerung der Stichprobe genutzt. Für die einzelnen analysierten Umläufe lagen bis zu 21 Messwerte vor. Dabei zeigte sich, dass die Verbräuche ohne Assistenz pro Umlauf erheblich variierten (teilweise mehr als 20 % zwischen Minimum und Maximum), was sowohl mit dem einzelnen Lokführer als auch den Betriebsbedingungen zusammenhängen kann. Da für den Betreiber im konkreten Fall nicht ein maximal mögliches Einsparpotenzial interessant war, sondern ein realistisches, wurden trotz der großen Schwankungen und der teils nur geringen Anzahl Umläufe mit InLineFAS-Fahrzeugen Mittelwerte gebildet. Dabei treten naturgemäß Umläufe mit hohem Einsparpotenzial, aber auch Umläufe mit Mehrverbrauch der InLineFAS-Fahrzeuge auf (Abbildung 4). In der Addition der mittleren Verbräuche mit und ohne Assistenzsystem ergibt sich eine mittlere Einsparung ab Tankstelle von ca. 5 %. Für den tatsächlichen Traktionsverbrauch (abzüglich der Nebenverbraucher) liegt die Einsparung höher und damit in der Größenordnung der von der UIC angegebenen Werte [UIC12].

Für die an den Wochenenden gemessenen Umläufe ergab sich ein ähnliches Bild, allerdings war die Stichprobe so gering, dass diese nicht für die Ermittlung des Einsparpotenzials genutzt wurde.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Wirksamkeit der technisch unterstützten kraftstoffsparenden Fahrweise konnte mit diesem Pilotprojekt erfolgreich nachgewiesen werden. Von der durch das System erreichbaren Reduktion des Kraftstoffverbrauchs kann zunächst das Eisenbahnverkehrsunternehmen profitieren. Die erzielte Verminderung der Emissionen ist ein Beitrag zum Umweltschutz. Langfristig stellen geringere Betriebskosten auch Wettbewerbsvorteile bei Ausschreibungen dar und können somit dazu beitragen, Preissteigerungen für Besteller und Fahrgäste gering zu

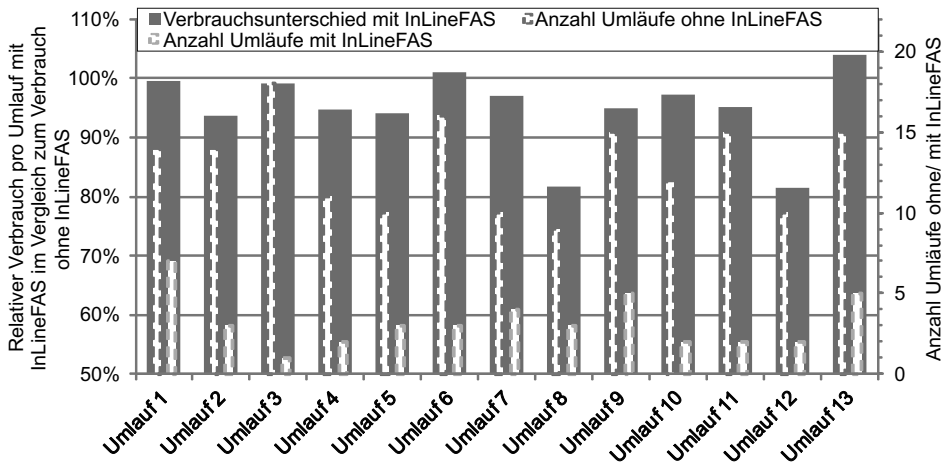


Abbildung 4: Mittlerer Verbrauchsunterschied von Umläufen mit InLineFAS im Vergleich zu Umläufen ohne InLineFAS (linke Ordinate) sowie Anzahl Umläufe mit und ohne InLineFAS (rechte Ordinate)

halten.

Die für den effektiven Einsatz von Assistenzsystemen notwendige Datenhaltung lässt sich durch deren Integration in Betriebsleitsysteme mit vertretbarem Aufwand realisieren. Nur bei guter Datenpflege und kontinuierlicher Sensibilisierung der Triebfahrzeugführer ist ein dauerhafter Erfolg sicherzustellen.

Aktuell werden weitere Verbesserungen am System vorgenommen, dazu zählen z. B. Untersuchungen zur optimalen Fahrweise bei längeren Abschnitten mit konstanter Höchstgeschwindigkeit. Hier verspricht die sogenannte Sägezahn-Fahrweise (Wechsel zwischen Antrieb und Auslauf) auch im Regionalverkehr weitere Einsparungen. Andere Schwerpunkte sind die Integration von Signalfreigabeproggnosen bei der Ermittlung der Fahrempfehlungen und die Einbeziehung anderer Ortungssysteme für die Nutzung in Bereichen mit schlechter GPS-Sicht.

Danksagung

Die Erprobung bei der VVSA GmbH war nur möglich durch den engagierten Einsatz des Geschäftsführers Andreas Putzer und des örtlichen Betriebsleiters René Bartz, denen dafür besonderer Dank gebührt. Die Autoren bedanken sich darüber hinaus bei den Triebfahrzeugführern der VVSA GmbH für die engagierte und kritische Mitwirkung bei der Erprobung des Assistenzsystems.

Literatur

- [Alb11] T. ALBRECHT, A. BINDER und C. GASSEL: „Energie- und betriebseffiziente Fahrweisen im Eisenbahnverkehr“. In: *EI – Eisenbahningenieur* 62.2 (2011), S. 39–43.
- [Bin12] A. BINDER und T. ALBRECHT: „Energieoptimale Echtzeit-Fahrzeitenregelung bei schienengebundenen Nahverkehrssystemen“. In: *23. Verkehrswissenschaftliche Tage*. Dresden, 29.–30. März 2012.
- [How93] P. G. HOWLETT, I. P. MILROY und P. J. PUDNEY: „Energy-efficient train control“. In: *12. Internationaler IFAC Weltkongress*. Sydney, Australien, 18.–23. Juli 1993.
- [Sta12] *Daten zur Energiepreisentwicklung*. Statistisches Bundesamt. 2012. URL: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/Energiepreisentwicklung.html>.
- [Tho11] F. THONIG, T. ALBRECHT und J. KRIMMLING: „Nutzung einer Sensorkombination aus GPS und Barometer zur Bestimmung des Neigungsprofils von Bahnstrecken“. In: *DGON-Symposium Positionierung und Navigation für Intelligente Verkehrssysteme (POSNAV-ITS)*. Darmstadt, 22.–23. Nov. 2011.
- [UIC12] *Recommendations of the project „RailEnergy“*. UIC. 2012. URL: <http://www.railenergy.eu/Recommendations.aspx>.
- [Yee04] R. YEE und P. J. PUDNEY: „Saving fuel on long-haul trains: Freightmiser initial trial results“. In: *Proceedings of CORE 2004 Conference of Railway Engineering*. Darwin, Australien, 20.–23. Juni 2004.

Korrespondierender Autor: Thomas Albrecht, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Telefon: +49 351 463-36765, E-Mail: thomas.k.albrecht@tu-dresden.de

Predictive Energy-Efficient Running Time Control for Metro Lines

Anne Binder, Thomas Albrecht

Technische Universität Dresden

The paper was published at the CASPT12 – Conference on Advanced Systems for Public Transport, Santiago, Chile, July 23–27, 2012.

Abstract

The effects of energy-optimal train control depend to a large extent on the available running time slack. As metro systems are characterized by frequent stops and short travel times, this slack is highly flexible and predominately only a few seconds and depends largely on the current traffic situation. If the metro system is not controlled automatically, the random dwell times will lead to small timetable deviations which have to be dispatched by the traffic management. The paper compares two approaches for real-time running time control: conventional running time control driving strictly according to a predefined timetable and predictive dynamic running time control where certain timetable restrictions are released in order to save energy. This paper applies the algorithm for energy-efficient running time control in the metro in Hamburg, Germany, and analyses for the first time the influence of the stochastic dwell times on traction energy consumption and punctuality. Random simulations are carried out based on historical dwell time data. It turns out, that the proposed predictive algorithm allows to reduce energy consumption without impact on the penalty relevant punctuality levels.

Keywords: Delay Management, Dynamic Programming, Energy-efficient Operation, Running Time Control

1 Introduction

1.1 The Hamburg metro system

Hamburg is the second largest city in Germany with about 1.8 million inhabitants and more than 4 million inhabitants in the suburban area. There is a political goal, that the predicted further increase of population and further need of mobility must not deteriorate the quality of the urban life style nor increase the impact on climate and environment. In order to meet

this requirement, modal shift of the traffic load to environmentally friendly and sustainable modes of transport is necessary, e.g. public transport systems which have less specific energy consumption per person. An attractive and efficient public transport is consequently an efficient solution in order to improve the environmental balance. Furthermore, the current modal split of 19 % still offers potential for further improvement.

The public transport offered in the Hamburg area is managed by the Hamburger Verkehrs-bund (HVV) since 1965. The Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) which was founded in 1911 is the most important transport provider. HOCHBAHN carried 414 million passengers reliably and efficiently by bus and metro systems in 2010. Three metro lines which cover a length of 101 km are the backbone of the public transport in Hamburg. One further metro line to the growing HafenCity is expected to start its service in 2012.

Service is executed on the network from 4:30 am to 0:30 am (weekdays), at the weekend trains run during the night times as well. In the city center an operation with a 5-minute-headway can be offered which is locally decreased in the peak hour. The trains which are 60 m or 120 m long are driven by a driver and operated manually. The maximum velocity of the trains is 80 km/h.

HOCHBAHN has committed itself to the protection of climate and resources for many years by signing the “UITP Charter on Sustainable Development”, by the participation in the VDV subcommittee “sustainability” and as member of the “Environmental Partnership Hamburg”.

In the metro branch of the company, important energy savings are achieved – among others – by the use of light weight vehicles, the efficient utilization of recuperative energy from braking (for heating on-board, recuperation to supply other trains or storing in energy storage systems in the power substations) and by the implementation of dynamic coasting speed information for energy-efficient driving. Consequently, the specific energy consumption could be reduced significantly. Currently, the specific energy consumption of the Hamburg metro is among the top values of all UITP member companies with similar operating characteristics.

But there are still ambitions to continue reducing the energy consumption by means of operational and technical improvements. One option that does not require costly changes in infrastructure or rolling stock is the application of advanced algorithms of energy efficient train control.

1.2 Energy-efficient train control

For energy-efficient rail-bound operation, two optimization levels can be distinguished:

1. Energy-optimal control of a single train between two consecutive stations,
2. Control of a train over multiple sections under consideration of traffic and network constraints.

The first level has been examined in the literature since the 1970s. The theory of energy optimal train control and the application of the Pontryagin's maximum principle leads to the four optimal driving regimes for energy efficient operation between two consecutive stations:

- acceleration with maximum acceleration power,
- cruising at maximum allowed speed,
- coasting,
- braking with maximum braking power.

In metro systems with short distances between two stations, usually the sequence acceleration – coasting – braking is applied. The available running time reserve until the next station determines the duration of the different regimes and consequently the energy consumption.

Some metro operators have been using static coasting boards, which are installed next to the tracks in order to indicate the place, where coasting can start, if the train had left the previous station on time. These coasting boards are not flexible: whenever a train has a delay, it depends on the abilities of the driver to estimate the necessary coasting speed, and whenever the planned running time changes (e.g. due to timetable changes because of modified passenger demand), the coasting boards have to be replaced.

In the Hamburg metro, a dynamic coasting speed advisory system is implemented track side and operates network-wide on all vehicles. A coasting speed advice referring to the next section is signaled to the driver during departure at each station. For each section of the line, train runs are simulated offline with different coasting speeds using the tool DYNAMIS [Rad98]. The resulting values for running time and energy consumption are stored in the database of the traffic management system as so-called coasting tables. Currently, the real time coasting speed is calculated dynamically depending on the planned arrival time at the next station. The available running time is calculated and the corresponding coasting speed is looked up in available coasting speed table and displayed to the driver (figure 1).

As the implementation of the system was executed stepwise, its actual effect on energy consumption can not be quantified. However, the international literature mentions between 5 % and 15 % of energy saving due to the implementation of comparable systems [How94].

The system utilizes exclusively the planned arrival times $t_{Tarr,i+1}$ and current departures times $t_{dep,i}$ which are planned accurate to the second. The currently implemented method of running time control (also referred to as conventional control (1)) is based on a lexicographic order of the two main targets:

1. time table adherence,
2. energy consumption.

That means, only if it is possible to arrive exactly on time (to the second) at the next station $i + 1$ according to the timetable, a coasting advice is given. Otherwise, the minimal running

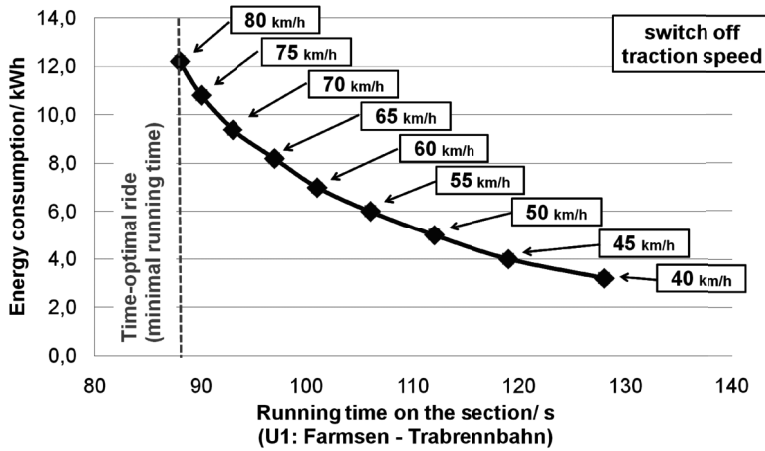


Figure 1: Characteristic dependency of energy consumption on running time and discrete switch off traction speeds on one section.

time $T_{\min,j}$ is applied on the section j . The arrival time $t_{\text{arr},i+1}$ at the next station $i + 1$ is defined

$$t_{\text{arr},i+1} = \max(t_{\text{Tarr},i+1}, t_{\text{dep},i} + T_{\min,j}). \quad (1)$$

The applied running time T_j which corresponds to the discrete and displayed coasting speed can be expressed as:

$$T_j = t_{\text{arr},i+1} - t_{\text{dep},i}. \quad (2)$$

Although it could be possible to calculate and display all resulting coasting speeds, the speeds are only displayed in 5 km/h steps because of human factor reasons. If a run at maximum speed has to be applied or no energy efficient driving can be applied on this section at all due to track layout and maximal speed, no speed will be signaled but the advice *MAX* is shown. In order to avoid passenger inconvenience, no driving speed is advised which would lead to coasting below 30 km/h.

The discretization of the coasting speeds results in discrete theoretic running times. If the intended running time is between two times stored in the table, the next lower running time is selected and therefore the higher coasting speed is displayed to the driver.

1.3 Predictive train control

The current system for energy efficient operation aims at the punctual arrival at the next station. Consequently, if the random disturbance in e.g. passenger change exceeds the planned running time reserve by a small amount, the regime *MAX* will be displayed. Figure 1 illustrates that the regime of 80 km/h, which is timeoptimal driving on this section as well, saves only two seconds in comparison to the next lower speed 75 km/h, but has a 10 % higher energy consumption. Thus, striving for on time arrival at each stop in case of small random disturbances leads to high energy consumption. For the primary optimisation criterion

– punctuality – it doesn't seem necessary to arrive exactly on time at each station, because passengers rather recognise delay minutes than seconds and according to the company internal definition of punctuality, each train is regarded being punctual if it has a timetable deviation of less than 120 seconds.

Researches in the field of rail-bound transport systems showed, that a modification of the arrival time by seconds can enlarge the energy efficiency dramatically without influencing the relevant punctuality criteria [Alb08]. This is called dynamic or predictive running time control. Thereby stations are classified in important stations - where the planned arrival time should be met with the precision of one second – and subordinated stations – where only an arrival time window is given which should be met by the train.

The consequences of the dynamic running time control on metro systems shall be determined by this case study of the HOCHBAHN. This analysis shall quantify the potential additional energy saving due to predictive running time control in undisturbed operation within the Hamburg metro system. Therefore the metro operation is modelled using a directed simulation graph model and historical realization data and the different control methods have been implemented.

2 System model

2.1 Directe simulation graph model

The idea of discrete-event simulation can be applied for distributed and directed systems [Pao99]. Thereby a complex system can be divided in discrete subprocesses and states which represent e.g. the system states and its characteristics. The transitions between the system states represent the requirements and cause-effect relations. Each state is characterized by its own demands and state duration. Only in case all the previous requirements are fulfilled and the previous states are completed, the directed next systems state is reached. The completion of a state which may lead to the transition and hence to the next state is now called process.

Significant for such discrete-event simulation is the independent of the system states. That means, that the state duration and characteristics are not influences by the previous system state characteristics, but only by the termination of the system states and of the other requirements. Hence, the system has to be a Markovian process.

2.2 System states in metro simulation

This approach can be transfered to the event-driven model of metro operation including the different train acting in the systems. Die discrete model of the complex metro system divides the operation into the different single system states. Figure 2 illustrates the different states which interact with each other. The most important time invariant states are: driving between two stations and the passenger change. As the different states are independent in low frequented metro systems, but have defined cause-effect relations, the discrete-event model

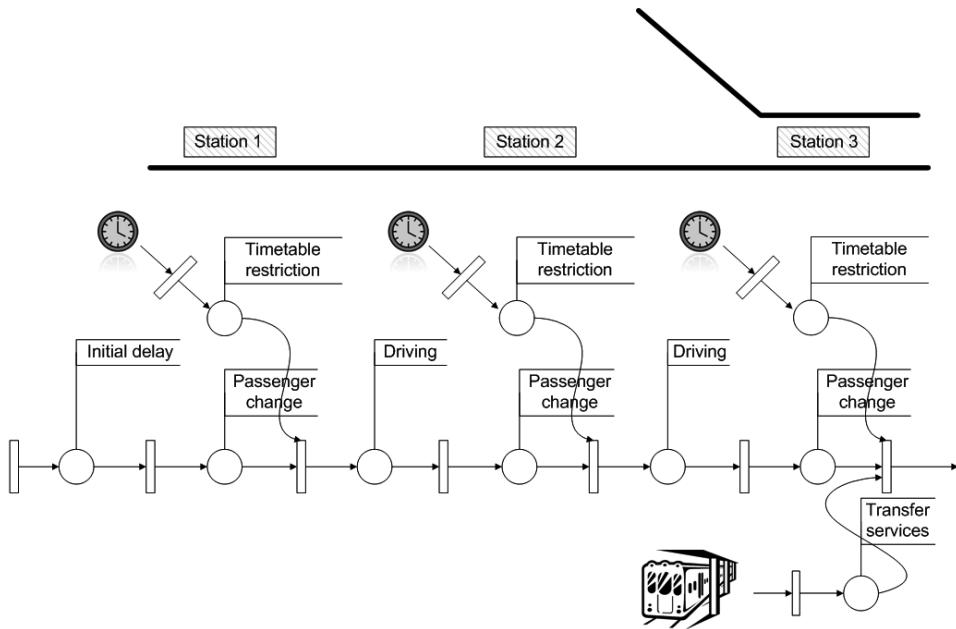


Figure 2: Discrete-event model of the metro system.

is suitable. That means an independence between the dwell times at the stops and consecutive train has to be assumed. This may not be suitable in high frequent metro systems, as the common known dependency between passenger change time and train frequency forms the dwell time at the station. But, in German metro system the correlation between dwell time and train frequency can not be verified. Anymore, the dwell time is influenced by a large number of random disturbances (e.g. last-minute-boarding, wheelchair users) and constraints that can be modeled separately (e.g. timetable restrictions). The transitions in the application of the models are e.g. the departure and arrival at one station. Each train represents an object acting in the system.

This approach requires the model of the different time invariant sub states including the characteristics, in order to simulate the consecutive process transitions. The model of the separated processes which lead to the complementation of the previous state can be done on different levels of abstraction:

- microscopic model,
- mesoscopic model,
- macroscopic model.

Furthermore one has to distinguish between nominal and stochastic simulation models. Nominal simulations are based on the definition of fixed parameters and times. It can be used, if no random influences are contained in the process or these influences should be

eliminated purposely, in order to quantify the influence of other random disturbances. In contrast to this, stochastic simulation is based on the interpretation of the process as stochastic process and requires the estimation of the random characteristics of the process. This kind of model will be suitable, if the random influences can not be considered in a microscopic model satisfactorily and the impact of this stochastic should be quantified.

Model of driving between two stations

The determination of vehicle relevant parameters such as timetable deviation or energy consumption requires necessarily a model of the driving process on a microscopic level.

The driving between two stations can be seen as nominal process, which means that the train is able to realize the required driving time as given. This assumption can be made, if the deviations between the theoretical and realized running times does not exceed a defined limit. This condition is always met in ATO systems (ATO = Automatic Train Operation), if the different driving parameters are modeled correctly. If trains are driven manually, running times usually vary significantly. In the Hamburg case, a driver advisory system is installed which means that – theoretically – realized running times and the planned or optimized running times should be very close. However, deviations due to e.g. human factors may occur and lead to a deviation from the controlled running time.

These random disturbances have to be eliminated if one wants to quantify different control strategies and the influence of the stochastic of another subprocess.

In the chosen simulation, the nominal simulation of the driving process in the half-automatic system enables the quantification of the influence of different random processes at the stop in the station, as e.g. both regular passenger change and unexpected long passenger changes. However the assumption has to be considered, that the running time given to the driver is realized. In case the optimized running times can not be realized by the driver, the real optimization results may differ from the used simulation, because the influence of the human behavior, especially the driver, is not included in this model.

In contrast to this, the driving process can be model as stochastic process, as well. However, this requires the estimation of the random characteristics of the driving including the technical and human disturbances.

Model of the passenger change

The passenger change can be modeled on different levels of abstraction. International approaches use a microscopic level based in the detailed description of the number and behavior of passenger [Zha08]. Disadvantage of these approaches is, that each used parameter such as passenger movement direction and speed have to be modeled separately. Huge numbers of international approaches of metro system model use a mesoscopic level [Bre91; Goo01; Lin10]. Thereby the exact behavior of the passenger is modeled in an abstract way. The traffic state and the duration of the passenger change is estimated based on known parameters such as train frequency and change time per passenger. Especially in low frequent

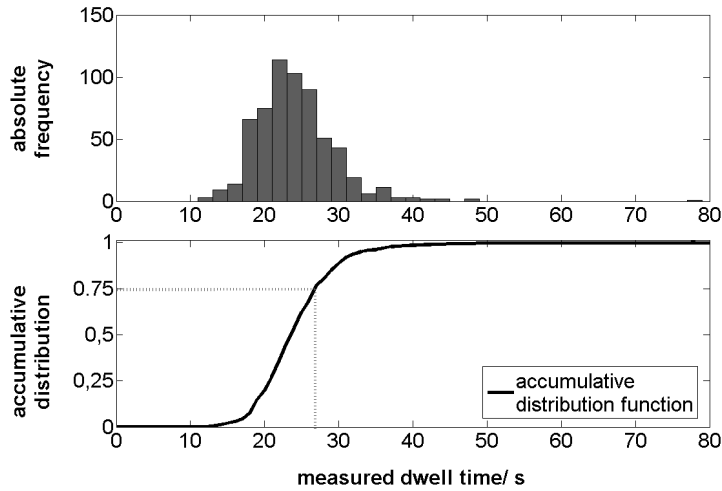


Figure 3: Dwell time distribution of measured data (line: U2 - clockwise, station: Lübecker Straße, LU, operation time: peak hour, timetable situation: seconds behind schedule).

rail-bound systems, these mesoscopic models reflect the station time not correct, as the station time is characterized by further influences such as last-minute-boarding or timetable restrictions. Therefore, macroscopic models can be applied. Independent of the exact numbers of passenger the station time is interpreted as a hole process. By using historical realization data, the complete duration of the station time is estimated. Suitable classification and filtering of the available data is necessary to achieve a realistic reflection of the traffic process. The historical data are used to determine a distribution function according to which the passenger change can be estimated in the optimization and randomly simulated in a complex operation simulation. In order to reflect the different traffic situations a suitable filter has consider the different significant aspects, such as:

- station or station categories,
- operation time (peak hour / off-peak hour),
- timetable situation.

If the data base is large, an representative accumulative distribution function can be determined (figure 3). In the metro system simulation the existence of the real distribution function enables the simulation of the station time according to the real historic operation. By using the Inverse transform sampling method, one can simulate macroscopic, random station times, which have occurred in real operation. Thereby a random number which has a uniform distribution between 0 and 1 is generated which signify the random chosen quantile and value of the accumulative distribution function. The simulated macroscopic dwell

time is the measured dwell time corresponding to this quantile. Advantage of this method is that each station time, which occurred in reality, may be simulated without smoothing e.g. high station times which could happen by applying standard distribution functions.

In the optimization the passenger change time has to be estimated. These accurate distribution function can be used to identify a useful quantile of the station time which should not be exceeded in the operation. E.g. the 75 %-Quantil means that in 75 % the stopping time will not exceed this specific time (dotted line, figure 3, bottom). Furthermore, this information can be used to integrate the stochastic of the available running time reserve in a multicriteria approach.

This macroscopic approach requires the assumption of statistical independence of the station time of the other trains running in the system. The hypotheses can only be taken in low frequented system which are mainly randomly disturbed. High frequency systems, such as Asian oder American metro systems or operation during large events in Germany as well, are characterized by interactions between consecutive trains. Consequently, a mesoscopic model has to be applied. The Hamburg metro system is not characterized by the commonly known dependency of train frequency and passenger change time in normal operation. In this case the station time is predominately influenced by unknown random influences which can only be considered by using such a macroscopic model.

2.3 State transitions

Besides the explained state characteristic models, the transition between the different states have to be considered. Thereby the additional restrictions and dependencies can be implemented. E.g. the transition station stop \rightarrow driving can be considered as operational but as safety relevant, as well. Safety relevant aspects such as occupied blocking sections have to be regarded in railway and metro system. Additionally, operational restriction can be defined and considered (see section 3.2).

2.4 Important quality criteria

In order to evaluate the different control strategies and quantify a good operation quality, a quality criteria has to defined. In railway operation different criteria can be applied [Bin11]. However, in order to calculate the influence on the most important parameters which are relevant for the operator, the total energy consumption and punctuality according to the exact to the second planned timetable have been chosen in this simulation runs.

The energy consumption can be taken from the available coasting tables and accumulated the different energy consumptions per section. The consideration of the energy recuperation and the amount of energy consumed by the auxiliary systems at the stations are not considered.

Punctuality has been analyzed for each stop and train according to the planned timetable. Due to randomly short dwell times a departure between the planned departure minute and

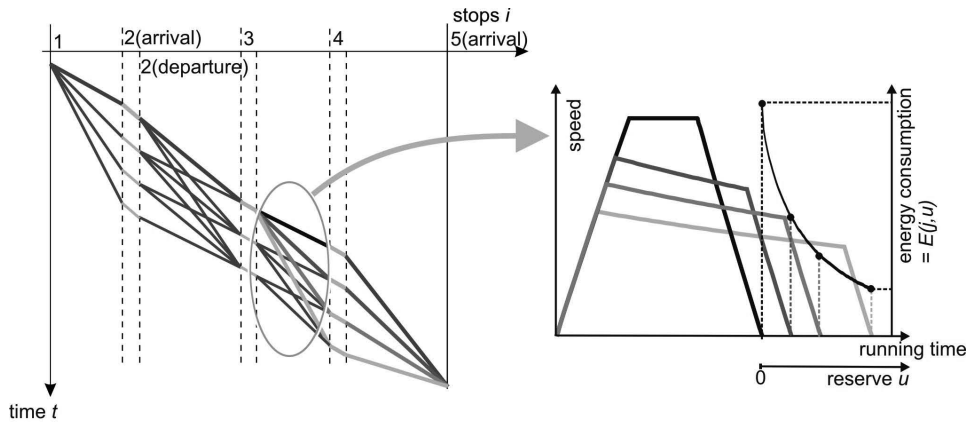


Figure 4: Principle of predictive running time control

departure second may occur at intermediate stations. These departures are regular and have been considered as punctual departure having a timetable deviation of 0 seconds.

3 Implementation of running time control

3.1 Line optimization: control of trains over multiple sections

The optimization of the driving between two stations (section optimization) has already been implemented in the Hamburg metro system. This conventional control (1) aims at an exact to the second arrival at the next stop. This leads to time optimal driving and high energy consumption in case of small disturbances with exceed the running time reserve on the next section.

One superior level, named in section 1.2, is the line optimization of the running and dwell times of one train over several $j \in [1; J]$ sections, so called predictive control (2). The running times from the current station until the next target station are determined in such a way, that traction energy consumption becomes minimal. Thereby the current available running time reserve as been considered in its entirety and not only between two stopping stations.

Between the targets a flexible allocation of the running time reserve u – and consequently different running times – especially in case of small timetable deviations can enable energy savings in real time operation, as time optimal driving on several sections can be reduced. Figure 4 illustrates the principle and theoretical background of the predictive running time control (2). It shows, that different allocations of running times on the sections are possible until stop 5 and different running times lead to different energy consumptions.

The optimization can be regarded as multistage optimization problem which can be solved by dynamic programming algorithms [Bel67], in case the characteristics of the cost function is Markovian. The total amount of current available running time reserve has to be

estimated under consideration of the minimal running times on each section $T_{\min,j}$ and the following predictive dwell times. Furthermore the reserve has to be discretized in U units depending on the accuracy of the running time adherence. The control variable u is the used amount of units of running time reserve on each section. Each stop $i \in [1; I]$ is understood as one decision stage in the application of predictive running time control. The amount of reserve u to be spent until a certain station represents a process state $x(i, k)$ on that stage i and can be expressed as:

$$x(i+1, k) = x(i, k) + u - T_{\min,j}. \quad (3)$$

The possible arrival times $t_{\text{arr},i}$ at the intermediate stations due to different used running time reserves until this decision stage can be calculated from the possible process states $x(i, k)$ at the stages i . The cost function of optimization is the total energy consumption between the target stations. Due to the application of *Bellman's Principle of Optimality*, the optimal allocation of the current available running time reserve can be determined recursively. The optimization criteria Q^* , which has to be calculated on each stage i and each state k (amount of reserve to be spent until a certain station) arises to:

$$Q^*(i, k) = \min_{u \in U_{i,k}} Q^*(i+1, k+u) + E(j, u). \quad (4)$$

Thereby $E(j, u)$ reflect the energy consumption on the section j between stop i and $i+1$ by the use of u units of the available running time reserve and the assumption of energy optimal driving.

3.2 Restrictions

In order to meet the requirements given by the operator different restrictions have to be considered in the optimization which limit the available solution flexibility.

Besides the definition of the important stops at which the arrival time has to be exact to the second further timetable restrictions limit the solution space. The important stops define the end of the predictive running time control. As the number and line allocation of the important stops the definition of the important stops is a sensible process. A small number of intermediate section between the target stations lead to less flexibility of the optimization and consequently less optimization potential. However, the target stations at which no timetable deviation is tolerated are necessary in order to guarantee operational quality. These stations might be places where lines end, merge or split or connections with other public transit lines are planned. Additionally, the departure time at these important stations has to be observed. On the one hand, the time table exact to the second has to be adhered. On the other hand, online modifications of the departure time as e.g. waiting for connecting services must be considered.

Between these target stations the intermediate arrival and departure times which are tolerated have to be defined. Thereby a target window with the latest and earliest tolerated

arrival or departure can be a suitable solution. These restrictions depend both on the public timetable and the delay penalty. Similar to the definition of the target stations, the defined size of the target window influence the optimization potential.

In the analyzed case study at the Hamburg metro system the target stations and tolerated delay have been chosen according to the operators understanding. Thereby a conservative approach has been chosen with a huge number of target stations (36 target stations out of 91 stations) and the tolerated target window has been defined by two following requirements:

- the earliest possible departure is the timetable departure minute,
- the latest possible departure is 30 seconds after the planned departure time exact to the second.

4 Results

4.1 Approach

In order to reflect all the relevant restrictions – especially the transfer service – all three metro lines U1, U2 and U3 and the planned interchanges between them are simulated in several scenarios. As these relevant transfer services are between the lines only in one direction, the simulation was done separated by each direction and with the characteristic parameters of two different time periods: one representing the peak hour, the other representing the off-peak hours.

Each simulation scenario is unique and characterized by a set of an initial delay at the first stations (of each vehicle at each line) and the individual dwell times at each station. These characteristic times are randomly determined according to the discrete distribution functions as explained in 2.2. Thereby the different events are treated as independent.

Both strategies are implemented under consideration of the similar restrictions. The randomly generated scenarios lead to the Monte Carlo simulation of the different control strategies which can be used to quantify the effect of the predictive running time control [Pot75]. For each direction (clockwise and anti-clockwise) and time slot 3000 scenarios have been analyzed.

4.2 Selected scenarios

The effect of the predictive running time control and the influence of the different control strategies depend on the scenario. On the one hand, scenarios exist which are characterized by significant energy savings on all lines and no influence on the timetable deviation at important stations. One of these is scenario A which shall be examined in detail below. On the other hand, scenarios may occur in which the operation is slightly negatively influenced by the predictive running time control. This is the case for scenario B which is explained as well.

Scenario A

Figure 5 illustrates a line section of the U2 clockwise between **Billstedt**, **BI** and **Berliner Tor**, **BT**. There, the relevant time-distance-graphs, coasting advices and running times for both control strategies – conventional control (1) and predictive control (2) – are displayed. The selected important stations are indicated with a bold station abbreviation and should not be influenced by a positive arrival delay. Italic printed colons in the table below represent sections on which time optimal driving (minimal running time) has to be executed due to the running time control¹.

An randomly long dwell time at the station **BI** leads to an initial departure deviation of 65 seconds. This may occur due to an unexpected high passenger load at the station platform or inhomogeneous distribution of passengers along the platform. The next important station is two sections ahead – **HN**. As the available running time reserve is smaller than the current timetable deviation, both control strategies apply time optimal driving on the next two sections until **HN**. The remaining departure deviation at **HN** is consequently 49 seconds with both strategies. The proximate important station is **BT** which is four sections ahead. The available running time reserve until **BT** is sufficient to catch up the current deviation. Consequently, predictive running control (2) reallocates the total available running time reserve until the next important station.

By contrast, conventional control aims at the immediate reduction of the current timetable deviation and applies time optimal control on the following three sections. Hence, the deviation is reduced completely until the subordinate station **BG**. A negative departure deviation according to the timetable which is accurate to the second means that the departure minute is already reached and the train is allowed to depart. That might occur due to the randomly short passenger change at station **BG**. The planned running time reserve on the last section leads to the application of the slowest admitted coasting speed. Consequently the additional (planned) running time can not be used for further reduction of energy consumption and the train arrives a few seconds before time at the important station **BT**.

Predictive running time control (2) allocated the whole available running time reserve between **HN** and **BT** along the next four sections. Therefore, time optimal running on the sections until **BG** can be prevented. This leads to high energy savings on these sections, but timetable deviation is reduced only gradually, too. The higher positive timetable deviations at each departure illustrate this effect. Despite the short dwell time at **BG** the departure deviation is still 15 seconds. The available running time reserve on the last section is enough to be on time (at the second) at the next important station **BT**. However, the running time on the last section is shorter than the running time used in conventional control.

¹ Maximum performance is either displayed by the signal *MAX* or a signaled (coasting) speed which leads to the similar running time or can not be achieved generally.

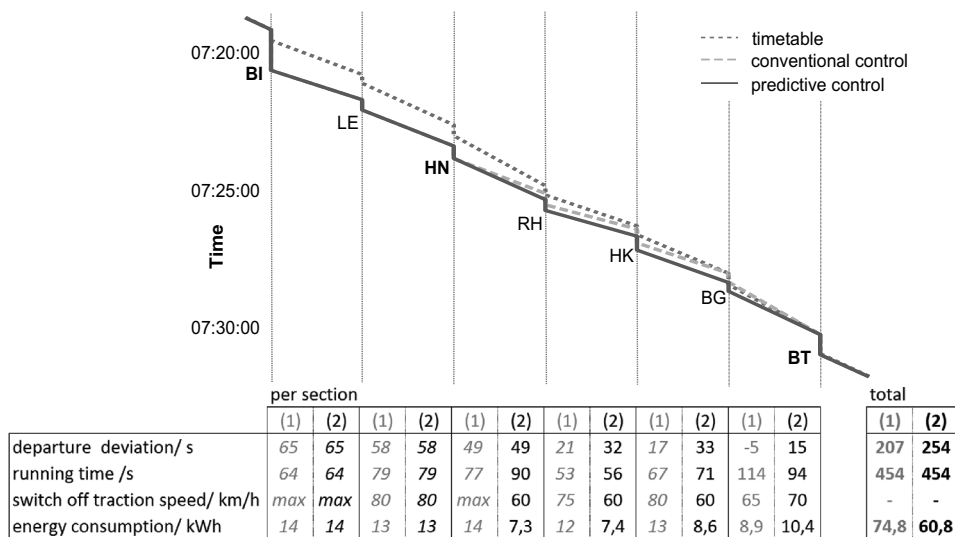


Figure 5: Scenario A - time-distance-diagram and coasting parameters.

Scenario B

Figure 6 illustrates another scenario which is characterized by randomly long passenger change times at several intermediate stations. The initial timetable deviation at the start station **Wandsbek Markt, WM** is nine seconds and conventional control (1) applies time optimal driving. Consequently, the timetable deviation can be reduced on the first section to 6 seconds at the next station **Wandsbeker Chaussee, WR**. In contrast to this, predictive control (2) leads to the stepwise reduction of the time table deviation, because the next important station with exact arrival time **Lübecker Straße, LU** is four sections ahead and the predictive available running time reserve is able to cover the initial timetable deviation. Thus, time optimal driving is not necessary on the first section, which lead to energy savings of 2,5 kWh. Similarly, on the next section energy consuming time optimal control is not required. Conventional control (1) decreases the timetable deviation and is punctual to the second at the Station **Ritterstraße, RI**. However, an unexpectedly long dwell time occurs at this intermediate station which is +20 seconds longer than the planned and predicted time (e.g. due to school classes, wheelchair user). Hence, the departure time deviation is 20 seconds. Since, the predictive control (2) accepted arrival deviations at this intermediate station the departure time deviation is likely wise higher with +29 seconds. Due to this high dwell time and further high dwell times both control strategies apply time optimal running times on the next nine sections. Thereby the predictive control is always nine seconds behind the conventional controlled train, as it had used the incorrect predicted reserves used on the first section. The time optimal run at the first second and the saved running time reserve leads to the arrival at the important interchange station **Kellinghusenstraße, KE** without any deviation. In contrast, the drag of the timetable deviation of the predictive control (2) leads

to a final timetable deviation at **KE** of four seconds. The wrong prediction of the dwell time affects the timetable deviation especially while using control (2). The total running time for this part of the track is consequently four seconds longer with the predictive control (2) which is the remaining time table deviation at the interchange station **KE**, as well.

Pessimistic prediction of the dwell times (use of a high dwell time quantile) may reduce the risk of such scenarios. However, the energy consumption on this sections can be reduced by 1 kWh (less than 1 %) through the predictive running time allocation.

4.3 Analysis

For each of the 3000 scenarios, which have been examined, energy consumption and timetable deviation were computed. Energy consumption is displayed as relative frequency distribution for each of the both control strategies in figure 7.

These figures show the typical characteristics of random processes. The randomness of the dwell times leads to a large range of consumed energy, this is what also can be observed in reality. The minimal values for energy consumption can only be achieved with dynamic running time control.

Using this control strategy 2, energy savings can be measured in almost all scenarios (more than 99 %). The overall mean energy saving is between 2 % and 3 %.

In addition to energy consumption, timetable deviation was analyzed and evaluated for both control strategies. Figure 8 shows the distribution of timetable deviation in classes of a width of five seconds. It becomes obvious, that control strategy 2 decreases the number of trains in the class 0 s – 5 s by 25 percent. The frequency of departures which are slightly delayed increases in the same way (classes 5 s – 10 s, 10 s – 15 s, 15 s – 20 s, 20 s – 25 s). This shows, that for trains which had departed at the second with conventional control are slightly delayed with dynamic train running time control, but not more than approximately 30 seconds. Delays which are significant for internal or external reporting (60 s or more) reach the same very low level with both methods of running time control. That means, that the high punctuality level of the Hamburg HOCHBAHN will not be deteriorated by the application of dynamic running time control.

Another aspect of the study was to examine, on how many sections time-optimal driving has to be applied. This leads to the display *MAX*. It can be seen from the simulation results, that the number of times *MAX* has to be shown to the driver is reduced on each of the three metro lines and in both time periods (peak and off-peak hours).

5 Conclusions and further research

The driver advisory system installed in the Hamburg HOCHBAHN network has been a major success and contributes significantly to the high energy efficiency of this metro system.

The study described in this paper has shown that it is possible to further increase the effects of this system using dynamic train running time control. In the frequently occurring

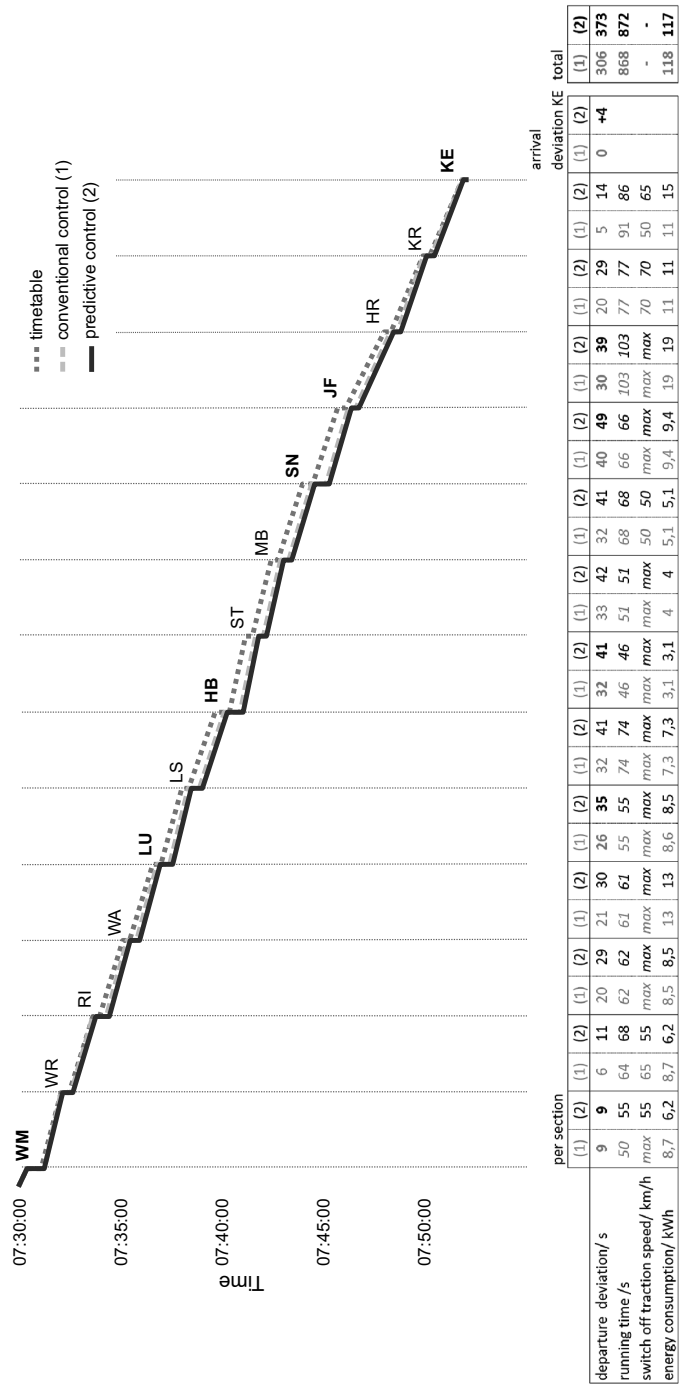


Figure 6: Scenario B – time-distance-diagram and coasting parameters.

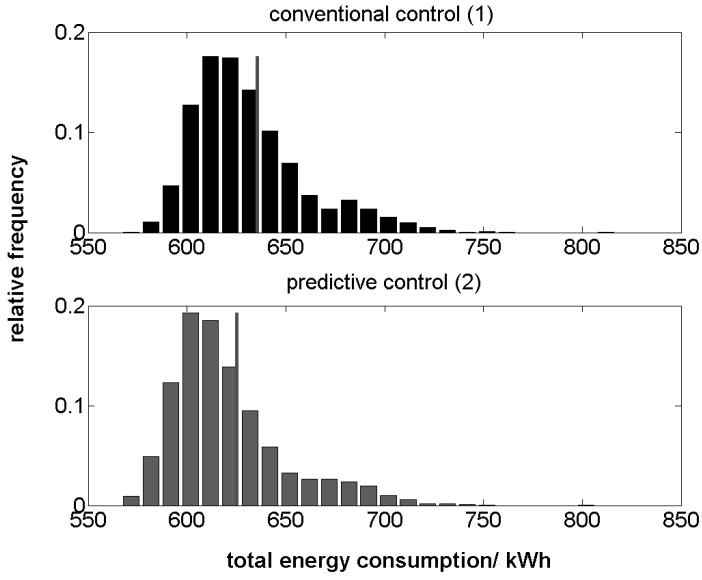


Figure 7: Total energy consumption of 3000 simulation runs for both control strategies.

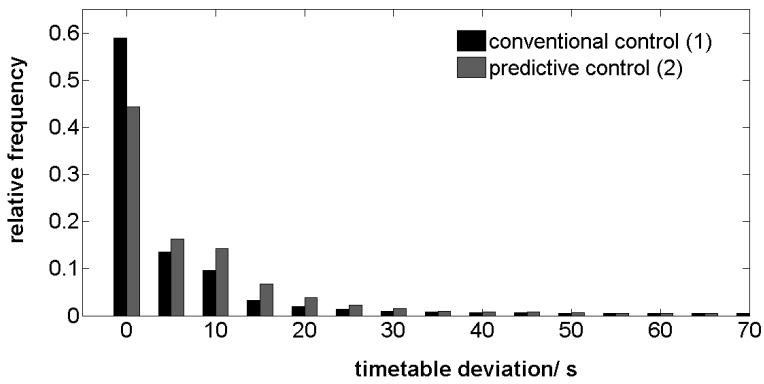


Figure 8: Timetable deviation of 3000 simulation runs for both control strategies.

case of small delays, additional energy savings can be obtained. On a system level, dynamic running time control could save another 2 % to 3 % of energy with respect to conventional running time control without negatively influencing punctuality, which is currently the most important objective of operation.

The most important constraints of running time optimizations are set by the timetable (departure times published to the passengers), the slack contained therein (running and dwell time slack), the available coasting speeds and the number and position of stations, which have to be reached exactly on time (at the second). Replacing some of these target points by further target windows could lead to more significant energy savings. In addition to that, the variation of the dwell time prediction quantile along the line within the optimization could lead to a more efficient optimization.

Acknowledgment

The results presented in this paper were obtained in a research study founded by Hamburger HOCHBAHN AG.

References

- [Alb02] T. ALBRECHT and S. OETTICH: “A new integrated approach to dynamic schedule synchronization and energy saving train control”. In: *Computers in Railways VIII*. Ed. by J. ALLAN. WITpress, 2002, pp. 847–856. ISBN: 978-1-85312-913-1.
- [Alb08] T. ALBRECHT: “Energy-Efficient Train Operation”. In: *Railway Timetable & Traffic*. Ed. by I. A. HANSEN and J. PACHL. Eurailpress, 2008, pp. 83–105. ISBN: 978-3-7771-0371-6.
- [Bel67] R. BELLMAN: *Dynamische Programmierung und selbstanpassende Regelungsprozesse*. München: Oldenbourg-Verlag, 1967.
- [Bin11] A. BINDER and T. ALBRECHT: “Application of Multi-Criteria Optimization Techniques for Dispatching in Conflict Situations”. In: *4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, Feb. 16–18, 2011.
- [Bre91] V. V. BREUSEGEM, G. CAMPION, and G. BASTIN: “Traffic Modeling and State Feedback Control for Metro Lines”. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 36.7 (1991), pp. 770–784. DOI: 10.1109/9.85057.
- [Cha96] C. CHANG and B. S. THIA: “Online rescheduling of mass rapid transit systems: fuzzy expert system approach”. In: *IEE Proceedings Electric Power Applications* 143.4 (1996), pp. 307–316. DOI: 10.1049/ip-epa:19960311.

- [Che05] J.-F. CHEN, R.-L. LIN, and Y.-C. LIU: “Optimization of an MRT Train Schedule: Reducing Maximum Traction Power by Using Genetic Algorithms”. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 20.3 (2005), pp. 1366–1372. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.851939.
- [Goo01] C. J. GOODMAN and S. MURATA: “Metro traffic regulation from the passenger perspective”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 215 (2001), pp. 137–147. DOI: 10.1243/0954409011531468.
- [How94] P. G. HOWLETT, I. P. MILROY, and P. J. PUDNEY: “Energy-efficient train control”. In: *Control Engineering Practice* 2.2 (1994), pp. 193–200. DOI: 10.1016/0967-0661(94)90198-8.
- [Lin10] W. LIN and J. W. SHEU: “Automatic train regulation for metro lines using dual heuristic dynamic programming”. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 224.1 (2010), pp. 15–23. DOI: 10.1243/09544097JRRT283.
- [Pao99] M. PAOLUCCI and R. PESENTI: “An Object-Oriented Approach to Discrete-Event Simulation Applied to Underground Railway Systems”. In: *Simulation* 72.6 (1999), pp. 372–383. DOI: 10.1177/003754979907200601.
- [Pot75] G. POTTHOFF: *Verkehrsströmungslehre*. Berlin: Transpress, Verlag für Verkehrswesen, 1975.
- [Rad98] A. RADTKE, L. MÜLLER, and A. SCHUMACHER: “DYNAMIS: a model for the calculation of running times for an efficient time-table construction”. In: *6th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems*. Lisbon, Portugal, Sept. 2–4, 1998. DOI: 10.2495/CR980301.
- [San97] B. SANZO and P. GIRARD: “Instantaneous Power Peak Reduction Train Scheduling Desynchronization Subway Systems”. In: *Transportation Science* 31.4 (1997), pp. 312–323. DOI: 10.1287/trsc.31.4.312.
- [Zha08] Q. ZHANG, B. HAN, and D. LI: “Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16.5 (2008), pp. 635–649. DOI: 10.1016/j.trc.2007.12.001.

Corresponding author: Anne Binder, Technische Universität Dresden, Faculty of Transport and Traffic Sciences “Friedrich List”, phone: +49 351 463-36764, e-mail: anne.binder@tu-dresden.de

Senkung des Energiebedarfs bei Straßenbahnen durch Vermeiden zusätzlicher Halte

Martin Lehnert, Christian Gassel, Tobias Matschek, Jürgen Krimmling
Technische Universität Dresden

Dieser Beitrag wurde veröffentlicht zu den 23. Verkehrswissenschaftlichen Tagen, Dresden, 29.–30. März 2012.

Zusammenfassung

Durch die qualitätsgerechte Steuerung von kooperativen Lichtsignalanlagen und dem Einsatz eines Fahrerassistenzsystems können nicht betriebsbedingte und somit zusätzliche Halte von Straßenbahnfahrzeugen vor Lichtsignalanlagen reduziert bzw. vermieden werden.

Dieser neuartige Ansatz der qualitätsgerechten Lichtsignalanlagensteuerung dient unter anderem der Erhöhung der Pünktlichkeit des öffentlichen Verkehrsmittels. Darüber hinaus können Energieeinspareffekte erzielt werden. Diese werden durch das Fahrerassistenzsystems zur energieoptimalen Fahrweise verstärkt.

Die Evaluation der Energieeinsparung wird durch ein neuartiges Verfahren basierend auf Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichten des Energiebedarfs und Semi-Markov-Prozessen bei der Abbildung von Fahrtbewegung und Zusatzhalten durchgeführt.

Eine Fallstudie aus dem Rahmen des Forschungsprojekts „Verbesserung der Verkehrssteuerung auf der Nord-Süd-Verbindung in der Landeshauptstadt Dresden“ illustriert die Umsetzung der Ansätze und Verfahren.

Schlagerworte: Energiebedarf, kooperative Lichtsignalanlagensteuerung, Straßenbahn, Semi-Markov-Prozess, Verkehrsflussoptimierung

1 Einleitung

Elektrische Verkehrssysteme des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) fahren bereits seit mehreren Jahrzehnten energetisch besonders effizient und lokal emissionsfrei. Zukünftig werden einerseits diese Systemvorteile elektrischer ÖPNV-Fahrzeuge bei Durchsetzung der Elektromobilität im Motorisierten Individualverkehr (MIV) schwinden. Andererseits ist eine kontinuierliche Kostensteigerung für Elektroenergie zu beobachten [Sta11].

Um die Systemvorteile zu erhalten, werden in diesem Beitrag Verfahren zur Verringerung des Energiebedarfs durch die Reduktion nicht betriebsbedingter und somit zusätzlicher Halte im Straßenbahnbetrieb sowie deren Evaluierung vorgestellt.

Ein erheblicher Anteil dieser Halte kann auf die Steuerung von Lichtsignalanlagen (LSA) zurückgeführt werden. Unter Berücksichtigung betrieblicher und energetischer Rahmenbedingungen des Straßenbahnbetriebs werden verschiedene Verfahren der ÖPNV-Bevorrechtigung an LSA vorgestellt. Außerdem wird mit einem Ansatz zur energiesparenden Fahrweise mittels Fahrerassistenzsystem (FAS) ein Anwendungsfeld kooperativer LSA erschlossen, welches bislang vornehmlich dem MIV vorbehalten war.

Erste Ergebnisse der entwickelten Verfahren wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts pilotiert und werden als Fallstudie am Ende des Beitrags vorgestellt.

2 Energetische und betriebliche Rahmenbedingungen

2.1 Energetische Rahmenbedingungen

Der Energiebedarf von Straßenbahnen wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Insbesondere folgende Einflussfaktoren sind zu nennen:

- Parameter der Streckengestaltung und Aufbau des Energieversorgungs (z. B. Topographie, Topologie, Haltestellenabstände, Fahrleitungsaufbau, -schaltungen und -speisekonzepte),
- Parameter des Fahrzeugs und des Fahrgastaufkommens (z. B. zuladungsbedingte Gesamtfahrzeugmasse, Wirkungsgrade),
- Parameter der Umgebungsbedingungen, die zu erhöhtem Energiebedarf der Hilfsbetriebe führen (z. B. Außentemperatur, Helligkeit),
- Parameter des Fahrplans und der Fahrweise des Fahrers (z. B. Fahrzeitreserven, Gestaltung von Anfahr- und Bremsvorgängen, Wahl der Höchstgeschwindigkeit) und
- Beeinflussung des Fahrspiels (z. B. zusätzliche Halte durch Behinderungen des MIV oder an LSA).

Ohne bauliche Eingriffe sowie jahreszeitenunabhängig erschließbar, sind die Einflussfaktoren der letzten zwei aufgezählten Punkte – der Fahrplan, das Fahrspiel und die Fahrweise.

Beim Fahrspiel führen zusätzliche Halte zu einer Erhöhung des Energiebedarfs. Diese treten entweder an LSA oder infolge von Behinderungen durch andere Verkehrsteilnehmer, insbesondere Fahrzeuge des MIV an Knotenpunkten ohne LSA (Linksabbieger), auf. Behinderungen an Knoten ohne LSA sind nur bedingt, d. h. vor allem durchverkehrsorganisatorische oder bauliche Maßnahmen beeinflussbar. Diese Maßnahmen sind nicht Gegenstand des Beitrags.

Die Halte an LSA haben im Wesentlichen folgende Ursachen:

- ÖPNV-Fahrzeuge haben keine / geringe Beeinflussungsmöglichkeiten (z. B. Festzeitsteuerung der LSA),
- konkurrierende ÖPNV-Verkehrsströme schränken bei Auswahl und Schaltung von Freigabebereichen der LSA ein und
- wichtige MIV-Verkehrsströme (z. B. Umleitungsverkehr von Bundesautobahnen) werden höher priorisiert als der ÖPNV.

Um diese zusätzlichen Halte und den daraus resultierenden Energiemehrverbrauch zu vermeiden, kann einerseits die LSA-Steuerung und andererseits das Annäherungsverhalten an LSA über ein FAS optimiert werden. Beide Ansätze werden in diesem Beitrag dargestellt. Dabei sind jedoch betriebliche Rahmenbedingungen (Einflussfaktor Fahrplan) zu berücksichtigen, die je nach Nahverkehrsunternehmen auch prioritär gegenüber der Energiebedarfs-senkung eingestuft werden.

Auf die Einflussmöglichkeiten durch die Fahrweise wird später im Beitrag eingegangen.

2.2 Betriebliche Rahmenbedingungen

Bei der betrieblichen Optimierung des Verkehrsablaufs verfolgen Verkehrsunternehmen vor dem Hintergrund der Konkurrenzfähigkeit zum MIV vorrangig zwei Ziele:

1. Verlässliche Reisezeiten durch Erhöhung der Pünktlichkeit (Kundenbindungsinstrument Fahrgast-Service-Garantien),
2. Kurze Reisezeiten durch Minderung der Fahrzeitreserven und daraus folgend zusätzliche Kostenvorteile durch Einsparung einzelner Fahrzeugumläufe.

Beide Optimierungsziele stehen sich teils konträr gegenüber. Die Verringerung der Fahrzeitreserven erhöht die Anfälligkeit gegenüber stark variierenden, meist LSA-verursachten Verlustzeiten. Somit sinkt die Verlässlichkeit der Reisezeit.

Um beiden Optimierungszielen Rechnung zu tragen, wird in den nachfolgenden Untersuchungen die Vermeidung zusätzlicher Halte an LSA aus betrieblichen Gründen verfolgt. Es werden Verfahren untersucht, die eine Haltvermeidung und trotzdem eine zeitoptimale Fahrt ermöglichen. Erst wenn diese Vorgabe durch eine relative ÖPNV-Bevorrechtigung an der LSA nicht erfüllt werden kann, z. B. aufgrund konkurrierender Verkehrsströme an großen Verkehrsknoten, soll ein anderer Weg beschritten werden. Dafür wird die Haltezeit an der LSA bei sonst zeitoptimaler Fahrt als prognostische Fahrzeitreserve frühzeitig ermittelt. Diese prognostische Fahrzeitreserve wird anschließend zur energieoptimalen Fahrzeugsteuerung (siehe später Abschnitt 3.5) so ausgenutzt, dass ein Passieren der LSA ohne Halt erfolgt.

Vermeiden zusätzlicher Halte an LSA		wegseitige Maßnahmen: Bevorrechtigung an LSA			
		absolut	relativ	qualitätsgerecht	keine
fahrzeugeigentliche Maßnahmen	ohne Fahrerassistenz	Ansatz 1: absolute Bevorrechtigung	Ansatz 2a: relative Bevorrechtigung ohne Fahrerassistenz	Ansatz 3a: qualitätsgerechte Bevorrechtigung ohne Fahrerassistenz	kein Eingriff
	mit Fahrerassistenz		Ansatz 2b: relative Bevorrechtigung mit Fahrerassistenz	Ansatz 3b: qualitätsgerechte Bevorrechtigung mit Fahrerassistenz	

Abbildung 1: Übersicht über die Ansätze zur Vermeidung zusätzlicher Halte.

3 Ansätze zur Vermeidung zusätzlicher Halte an LSA

3.1 Überblick

Zur Verbesserung des ÖPNV-Verkehrsablaufs können mithilfe von kooperativen und verkehrsabhängigen LSA verschiedene Ansätze zur Vermeidung unnötiger Halte an LSA gewählt werden. Dies sind (siehe Abbildung 1):

1. absolute ÖPNV-Bevorrechtigung,
2. relative ÖPNV-Bevorrechtigung ohne / mit Fahrerassistenz und
3. qualitätsgerechte ÖPNV-Bevorrechtigung ohne / mit Fahrerassistenz.

3.2 Absolute ÖPNV-Bevorrechtigung

Bei einer *absoluten ÖPNV-Bevorrechtigung* erhält das ÖPNV-Fahrzeug bei Erreichen der LSA *immer* eine Freigabe. Somit kommt es *nie* zu einem Halt des Fahrzeugs an der LSA aufgrund der LSA-Schaltung. Technische Voraussetzung dieses Ansatzes ist ein LSA-Steuergerät, das flexibel die Freigabezeiten aufgrund einer zuvor ermittelten Ankunftsprognose des ÖPNV-Fahrzeugs ermittelt und umsetzt.

Durch die absolute Bevorrechtigung werden stets zeitoptimale Fahrten unabhängig von der Fahrplanlage der Fahrzeuge unterstützt. Ein Mehrenergiebedarf aufgrund eines Halts an der LSA wird vermieden. Hinsichtlich der Fahrplanlage des Verkehrsmittels ist eine Beeinflussung mit diesem Ansatz jedoch nicht möglich.

Ferner stößt der Ansatz an einem lichtsignalgesteuerten Knotenpunkt mit konkurrierenden und jeweils zu bevorrechtigenden ÖPNV-Verkehrsströmen an seine Grenzen. Auch verkehrspolitisch ist eine absolute ÖPNV-Bevorrechtigung aufgrund der mitunter entstehenden Restriktionen für den Individualverkehr nicht unumstritten.

3.3 Relative ÖPNV-Bevorrechtigung

Die *relative ÖPNV-Bevorrechtigung* an einer LSA berücksichtigt neben den ÖPNV-Verkehrsströmen auch die Verkehrsströme anderer Verkehrsträger. Die Abarbeitung der Signalfreigaben erfolgt im Allgemeinen nach dem FIFO-Prinzip (First-In-First-Out). Ein absolutes Vermeiden des Halts von ÖPNV-Fahrzeugen an der LSA kann somit nicht garantiert werden. Die relative ÖPNV-Bevorrechtigung *ohne* Fahrerassistenz wird derzeit als Stand der Technik bei Neuausrüstungen von LSA-Beeinflussungsanlagen vielfach umgesetzt.

Sie stellt in der Regel eine wesentliche Verbesserung für den ÖPNV gegenüber einer unbeeinflussten LSA (Festzeitsteuerung) dar. Es treten für das ÖPNV-Fahrzeug weniger Halte vor der LSA auf, womit auch eine energetische Einsparung erzielt werden kann. Eine Beeinflussung hinsichtlich der Fahrplanlage des Verkehrsmittels ist mit diesem Ansatz jedoch ebenfalls nicht möglich.

Durch einen neuartigen Ansatz kann bei kooperativen LSA zusätzlich zur relativen ÖPNV-Bevorrechtigung ein FAS zum energiesparenden Fahren im Straßenbahnbetrieb zum Einsatz kommen (Abschnitt 3.5).

3.4 Qualitätsgerechte ÖPNV-Bevorrechtigung

Über die Anforderungen des Ansatzes nach Abschnitt 3.3 hinausgehend, wird bei der *qualitätsgerechten ÖPNV-Bevorrechtigung* der Freigabebereich hinsichtlich der Gesamtverkehrsqualität des Knotenpunktes von der LSA-Steuerung ermittelt [Mat11]. Neben der MIV-Verkehrslage werden fahrgastrelevante Kriterien, wie die Pünktlichkeit und Sicherung ungeplanter Anschlüsse, einbezogen. Um Fahrplanabweichungen zu reduzieren, erhalten verspätete Bahnen eine erhöhte Bevorrechtigung, während verfrühte Bahnen nicht vorrangig behandelt werden.

Durch die hinsichtlich der Qualität des Betriebsablaufs verbesserte Auswahl und Schaltung von Freigabebereichen werden bei tendenziell leicht verspäteten Fahrzeugen weniger Halte an der LSA auftreten und Energieeinsparungen erzielt. Ein absolutes Vermeiden des Halts an der LSA kann, wie auch beim Ansatz im Abschnitt 3.3 nicht erreicht werden.

Bei der Kombination aus qualitätsgerechter ÖPNV-Bevorrechtigung und dem im folgenden Abschnitt vorgestellten FAS können neben den prioritären Anforderungen an die Qualität des Betriebsablaufs auch die Fragen des energiesparenden Betriebs Berücksichtigung finden.

3.5 Einsatz eines Fahrerassistenzsystem (FAS)

Unter Kenntnis der Freigabebereiche einer relativen oder qualitätsgerechten Bevorrechtigung ist der Einsatz eines FAS zum energiesparenden Fahren im Straßenbahnbetrieb möglich. Eine praktikable und energieoptimale Fahrweise zwischen zwei Haltestellen lässt sich im manuellen Betrieb ähnlich zur Vollbahn aus dem Maximumprinzip nach PONTRJAGIN ableiten [Gas10]. Um unnötige Halte zu vermeiden, müssen zunächst die Soll-Fahrtzeiten

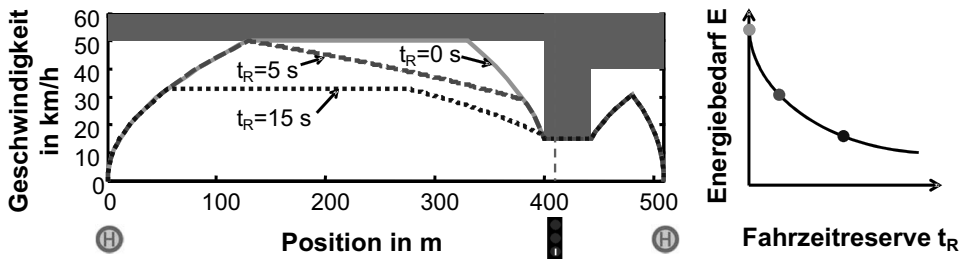


Abbildung 2: Senkung des Energiebedarfs E durch Nutzen der Fahrzeitreserve t_R .

zwischen zwei Haltestellen unter Berücksichtigung der Freigabebereiche der LSA bestimmt werden. Aus der Differenz zur zeitoptimalen Fahrt ohne Halt an der LSA resultiert eine Fahrzeitreserve. Mit dieser kann anschließend die energieoptimale Fahrweise nach dem Maximumprinzip bestimmt werden. In der Regel ergibt sich die Abfolge der Fahrregime: „Anfahrt mit maximal zulässiger Beschleunigung“, „Fahrt mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit“, „Ausrollen“ und „Bremsen mit maximal zulässiger Bremsverzögerung“ [How95; Liu03]. In Abhängigkeit von der verfügbaren Fahrzeitreserve kann zusätzlich ein Absenken der Beharrungsgeschwindigkeit erforderlich sein. Abbildung 2 stellt diese Zusammenhänge für drei verschiedene Fahrzeitreserven zwischen der Starthaltestelle und der folgenden LSA dar.

Dem Fahrpersonal werden durch das Assistenzsystem optisch oder akustisch Abfahrts-empfehlungen an der letzten Haltestelle vor der LSA sowie Empfehlungen zum Ausrollzeitpunkt bzw. zur Höchstgeschwindigkeit mitgeteilt. Dies trägt zur Reduktion des Energiebedarfs bei, da nunmehr alle Fahrten energieoptimal, einige darunter auch zeitoptimal stattfinden. Somit entsteht ein doppelter Energiespareffekt, zum einen durch die Haltvermeidung, zum anderen durch die energiesparende Fahrweise.

4 Energiebedarfsbestimmung mittels Verteilungsfunktionen¹

4.1 Aufstellen von Verteilungsfunktionen für den Energiebedarf

Im Abschnitt 2.1 wurden die vielfältigen Einflussgrößen auf den Energiebedarf aufgezeigt. Betrachtet man diese Größen in ihrer Gesamtheit, wird der Energiebedarf eines Fahrzeugs zwischen zwei Halten in der Realität stark streuen und kann damit als zufällige (stochastische) Größe angesehen werden. In [Hel71] erfolgte eine derartige Beschreibung beispielsweise für den Energiebedarf von Unterwerken und Speiseabschnitten eines Straßenbahnbetriebs. Ziel einer solchen Beschreibung ist es, den Energiebedarf eines Fahrzeugs als stetige Dichtefunktion $f(x)$ darzustellen.

Um das Auftreten der charakteristischen ungeplanten Zwischenhalte an LSA einzubeziehen, wurde ein neuartiges Verfahren angewandt. Dabei wird der Energiebedarf für jedes

¹ Die in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren sind während des Promotionsvorhabens [Leh11] und der dazu zeitgleichen Tätigkeit von M. Lehnert am Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme entstanden.

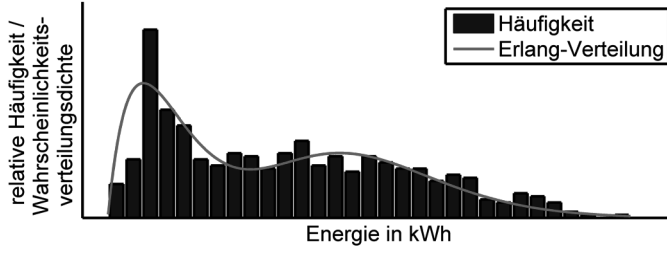


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte der Energie auf einem Streckenabschnitt.

von zwei Halten eingeschlossene Teilstück der Fahrt z. B. auf der Grundlage von Messungen durch eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte approximiert (siehe Abbildung 3).

Besonders geeignet für die weiteren Berechnungen sind die sehr flexibel anpassbaren und einfach Laplace-transformierbaren Erlang-Verteilungen und deren Summen (gemischte Erlang-Verteilungen) mit der Form:

$$f(x) = \sum_{m=1}^l w_m \gamma(x, \lambda_m, k_m) \quad \text{mit} \quad \sum_{m=1}^l w_m = 1 \quad \text{und} \quad (1)$$

$$\gamma(x, \lambda, k) = \frac{\lambda^k}{(k-1)!} x^{k-1} e^{-\lambda x} \quad \text{mit} \quad k \in \mathbb{N} \text{ und } x, k, \lambda > 0. \quad (2)$$

4.2 Modell der Zusatzhalte

Der Halt eines Fahrzeugs an der Start- und Zielhaltestelle des untersuchten Streckenabschnitts sowie jeder charakteristische ungeplante Zwischenhalt auf der Strecke wird als Zustand $i \in Z$ eines zufälligen Prozesses betrachtet. Die Menge aller Zustände

$$Z = \{1, 2, \dots, N\}, \quad N \in \mathbb{N} \quad (3)$$

ist endlich und bildet den Zustandsraum. Der Prozess beschreibt den zufälligen Wechsel der Zustände $Z(\theta)$ zu diskreten Zeiten θ bei der Fahrt zwischen zwei Haltestellen. Der Prozess soll die Markov-Eigenschaft haben.

Mittels der Übergangswahrscheinlichkeiten $p_{ij}(\theta)$, die die Wahrscheinlichkeit für den Übergang vom Zustand $i \in Z$ in den Zustand $j \in Z$ zum Zeitpunkt θ angeben, und die in der vorliegenden Untersuchung zeitunabhängig sind:

$$p_{ij} = p_{ij}(\theta) \quad (4)$$

ist eine homogene Markov-Kette definiert. Die Anfangsverteilung sei auf den ersten Zustand,

die Start-Haltestelle des Streckenabschnitts, konzentriert.

Die so beschriebene Markov-Kette kann in Anlehnung an Modelle der Graphentheorie auch als Graph $G = (V, K)$ mit einer Menge von Knoten V und einer Menge von Kanten K modelliert werden. Die Menge der Knoten entspricht dabei der Menge der Zustände des Prozesses; die Kanten sind allgemein definiert durch:

$$K \subseteq V \times V. \quad (5)$$

4.3 Berücksichtigung des Energiebedarfs im Modell

Um den Energiebedarf im Modell zu berücksichtigen, wird der Graph mit dem Gewicht $D(d)$ der Kante d kantengewichtet und damit zu einem Tripel $G = (V, K, D)$. Das Kantengewicht sei der Energiebedarf für die Fahrt zwischen den begrenzenden Knoten (Zuständen) der Kante. Dabei kann der Energiebedarf als deterministische Größe, wie beispielsweise dem mittleren Energiebedarf oder als Zufallsgröße (Verteilungsfunktion) berücksichtigt werden.

Im einfacheren ersten Fall des deterministischen Kantengewichts ergibt sich der Energiebedarf \tilde{E} zwischen zwei Haltestellen aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten p_l für alle m zufällig gewählten Pfade B_l durch den Graph und dem dabei benötigten deterministischen Energiebedarf E_l :

$$\tilde{E} = \sum_{l=1}^m p_l \cdot E_l. \quad (6)$$

Dieser einfache Ansatz kann die Vielzahl der Einflussfaktoren auf den Energiebedarf nicht berücksichtigen. Dafür wird der zweite Ansatz, der Energiebedarf als Zufallsgröße bei der Berücksichtigung als Kantengewicht, gewählt. Der beschriebene Prozess wird somit zu einem Semi-Markov-Prozess. Dabei sind die Kantengewichte D_{ij} des Graphen durch eine Verteilungsfunktion des Energiebedarfs beschrieben und nur von Start- und Zielzustand der Kante abhängig.

Um den Energiebedarf zwischen zwei Haltestellen zu bestimmen, sind wiederum alle Pfade durch den Graph mit ihren Auftretenswahrscheinlichkeiten und Verteilungsfunktionen zu erfassen. Diese Betrachtung führt zu mehrfachen Faltungsintegralen, die günstiger Weise durch eine Transformation in den Laplace-Bereich gelöst werden. Die Rücktransformation erfolgt durch ein numerisches Verfahren, den Gaver-Stehfest-Algorithmus. Ausführlich können die Verfahren sowie die einzelnen Berechnungsschritte in [Leh11] und [Gav66; Kli86; Kli89; Kni82; Nol81; Ste70a; Ste70b; Stö70] nachgeschlagen werden.

Um das vorgestellte Verfahren numerisch stabil zu halten und gleichzeitig negative Teilenergien aufgrund von Rekuperationsvorgängen berücksichtigen zu können, werden die zwei Beschreibungsvarianten des Energiebedarfs pro Kante miteinander kombiniert. Dazu wird der Energiebedarf jeder Kante in einen deterministischen und einen stochastischen Anteil aufgeteilt, für beide Anteile der Energiebedarf im Zielzustand getrennt berechnet und anschließend die Teilergebnisse wieder zu einer gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilungs-



Abbildung 4: Lageplan des Untersuchungsgebiets (Kartendaten aus [OSM12; VAM12]).

dichte:

$$p(u) = \begin{cases} 0 & \text{für } u < \tilde{E}^* \\ p^o(u - \tilde{E}^*) & \text{für } u \geq \tilde{E}^* \end{cases} \quad (7)$$

des Energiebedarfs u zusammengefügt. Dabei ist \tilde{E}^* der Energiebedarf im Zielzustand für den deterministischen Anteil und $p^o(u)$ die Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte für den Energiebedarf des stochastischen Anteils.

Auf diese Weise entsteht die Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte für den Energiebedarf im Zielzustand (Zielhaltestelle), die für die weiteren Betrachtungen genutzt werden kann. Am Beispiel des Verkehrsknotens Nürnberger Platz wird die Umsetzung des Berechnungsverfahrens für den Energiebedarf im folgenden Kapitel unterlegt.

5 Fallstudie

5.1 Forschungsprojekt Nord-Süd-Verbindung Dresden

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Verbesserung der Verkehrssteuerung auf der Nord-Süd-Verbindung in der Landeshauptstadt Dresden“ (NSV-Projekt) soll die multimodale Verkehrsqualität durch den erstmaligen Einsatz einer qualitätsgerechten Bevorzugung mit Einsatz eines FAS erhöht werden.

Diese Maßnahmen kommen auf dem Nord-Süd-Korridor in Dresden schrittweise vom Nürnberger Platz bis zum Albertplatz zum Einsatz. Abbildung 4 stellt die räumliche Ausdehnung, Tabelle 1 den zeitlichen Verlauf der ersten Umsetzungsphase dar.

In der folgenden Fallstudie wird der Einfluss dieser Maßnahmen auf den Energiever-

Tabelle 1: Projektstufen der ersten Umsetzungsphase.

Stufe	Beschreibung
Vergleichsfall	Relative Bevorrechtigung ohne FAS durch herkömmliche verkehrsabhängige Steuerung (bis 10/2011)
Projektstufe 1	Qualitätsgerechte Bevorrechtigung an der LSA Nürnberger Platz ohne FAS (Regelbetrieb ab 11/2011)
Projektstufe 2	Qualitätsgerechte Bevorrechtigung an LSA Nürnberger Platz und LSA

brauch in Relation zum Vergleichsfall abgeschätzt.

5.2 Energiebedarf für die Teilstrecken

Für die Untersuchung des Energiebedarfs werden die Teilstrecken (TS):

- TS 1-3: von der Starthaltestelle Reichenbachstraße ohne Halt zur Zielhaltestelle Nürnberger Platz,
- TS 1-2: von der Starthaltestelle Reichenbachstraße bis zum Halt an der LSA Nürnberger Platz und
- TS 2-3: vom Halt an der LSA Nürnberger Platz bis zur Zielhaltestelle Nürnberger Platz

der Straßenbahnlinie 3 der DVB AG betrachtet. Damit sind jeweils Fahrten mit und ohne zusätzlichen Halt an der LSA beschreibbar (Abbildung 5).

Mit Messdaten aus dem Straßenbahnnetz in Dresden [Kla08; Leh08] wurden die Verteilungsdichtefunktionen des Energiebedarfs für die genannten Teilstrecken ermittelt. Sie sind in Abbildung 6 dargestellt. Hierbei ist für den Energiebedarf der Betrachtungspunkt Stromabnehmer gewählt und somit sind sowohl die Rekuperation ins Fahrleitungsnetz als auch die Verwendung von Rekuperationsenergie an Bord (Nebenverbraucher) bereits berücksichtigt. Es wird unterstellt, dass sich die Rekuperationsraten während der Untersuchungen nicht verändern.

5.3 Haltewahrscheinlichkeiten in unterschiedlichen Projektstufen

Durch die im Abschnitt 3 beschriebenen Maßnahmen der LSA-Beeinflussung ohne Anwendung eines FAS wird sich die Verteilung des Energiebedarfs auf den Teilstrecken nicht ändern. Entscheidend werden durch die Maßnahmen der relativen und qualitätsgerechten ÖPNV-Bevorrechtigung jedoch die Haltewahrscheinlichkeit an der LSA und damit die Übergangswahrscheinlichkeiten im Semi-Markov-Prozess beeinflusst.

Für den beispielhaft gewählten Verkehrsknoten Nürnberger Platz liegen für die landwärtige Straßenbahnlinie 3 Erhebungsdaten für:

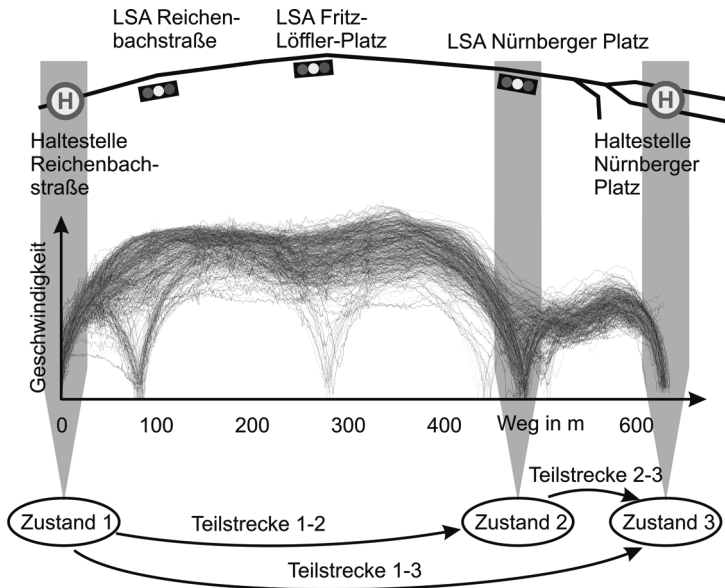


Abbildung 5: Teilstrecken im Untersuchungsgebiet.

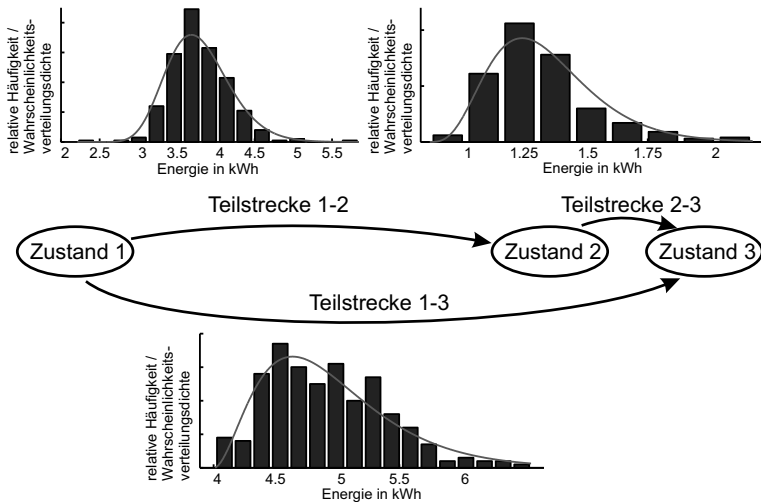


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte der Energie auf den Teilstrecken.

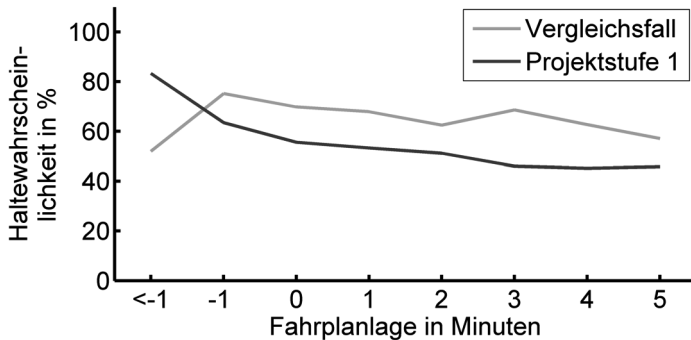


Abbildung 7: Haltewahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Fahrplanlage für Vergleichsfall und Projektstufe 1.

- Vergleichsfall mit relativer ÖPNV-Bevorrechtigung (ohne FAS) für den Zeitraum vom 04.04.-03.05.2011 mit 2647 Fahrten und
- Projektstufe 1 mit qualitätsgerechter ÖPNV-Bevorrechtigung (ohne FAS) für den Zeitraum vom 01.12.-31.12.2011 mit 2270 Fahrten

vor. Abbildung 7 stellt die Haltewahrscheinlichkeit beider Bevorrechtigungsarten am Nürnberger Platz gegenüber. Während bei der klassischen relativen Bevorrechtigung keine Abhängigkeit zur Fahrplanlage nachweisbar ist, fällt bei einer qualitätsgerechten Bevorrechtigung die Haltewahrscheinlichkeit mit zunehmender Verspätung des Fahrzeugs. Zur Verbesserung der Fahrplanlage werden verfrühte Fahrzeuge häufiger als im Vergleichsfall am Knoten aufgehalten. Dahingegen werden Verlustzeiten und Haltewahrscheinlichkeiten mit steigender Verspätung reduziert. Aufgrund der verkehrsknotenspezifischen Abhängigkeiten ist eine weitere Verringerung der mittleren Haltewahrscheinlichkeit auch für stark verspätete Bahnen (größer 5 Minuten) nicht möglich.

Aus den dargestellten fahrplanlageabhängigen Haltewahrscheinlichkeiten lässt sich ein gewichtetes Mittel zum Halt an der LSA über alle Betrachtungsfälle ableiten. Dieses beträgt:

- 68,6 % für den Vergleichsfall und
- 52,0 % für die Projektstufe 1.

Somit können mit Umsetzung der Projektstufe 1 im Mittel bereits über 15 % der Halte an der LSA vermieden werden.

Mit Einsatz des FAS in Projektstufe 2 kann ein deutliches Absinken der Haltewahrscheinlichkeit erwartet werden. Die Auswertung erster Testfahrten bestätigt diese Aussage.

5.4 Energiebedarf nach Umsetzung der Projektstufe 1

Mit dem im Abschnitt 4 dargestellten Rechenweg und den in den vorangegangenen Abschnitten angegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichten der Energie auf den Teilstre-

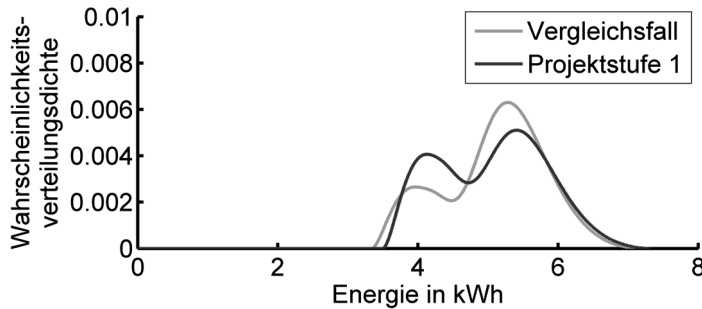


Abbildung 8: Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichten für den Energiebedarf auf dem gesamten Untersuchungsabschnitt für Vergleichsfall und Projektstufe 1.

cken sowie den in Form der Haltewahrscheinlichkeiten auftretenden Übergangswahrscheinlichkeiten wird der Energiebedarf für den gesamten Untersuchungsabschnitt zwischen den Haltestellen Reichenbachstraße und Nürnberger Platz berechnet. Es ergeben sich die Verteilungen in Abbildung 8.

In dieser Abbildung ist deutlich erkennbar, dass die qualitätsgerechte Bevorrechtigung an der LSA Nürnberger Platz eine Modifikation des Energiebedarfs hin zu kleineren Werten mit sich bringt. Betrachtet man den Mittelwert ist nur eine geringfügige Energiebedarfssenkung von 5,05 kWh auf 5,02 kWh festzustellen. Diese beschreibt jedoch bereits das Mittel über alle auf dem Abschnitt verkehrenden landwärtig fahrenden Bahnen der Linie 3.

Die geringfügige Reduktion des Energieverbrauchs steht im Kontext mit den umgesetzten Komponenten der ersten Projektstufe. Vorrangiges Ziel dieser Stufe war die erfolgreiche Pilotierung der qualitätsgerechten Bevorrechtigung, welche ausschließlich Größen der Verkehrsqualität berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.4). Dennoch konnte zusätzlich der wenngleich geringe Energieeinspareffekt erzielt werden, der sich als Folge der verstärkten Bevorrechtigung verspäteter Fahrzeuge ergibt.

5.5 Prognose für Zustand nach Umsetzung der Projektstufe 2

Mit der Projektstufe 2 wird eine qualitätsgerechte Bevorrechtigung am Verkehrsknoten Reichenbachstraße sowie ein FAS zur Haltvermeidung am Verkehrsknoten Nürnberger Platz umgesetzt. Das vorgestellte Verfahren zur Berechnung des Energiebedarfs kann auf dieser Projektstufe durch hinzufügen des zusätzlichen Knotens „Reichenbachstraße“ erweitert werden.

Die Einflüsse einer Fahrregimeanpassung durch die energiesparende Fahrweise aufgrund der Assistenzsystem-Empfehlung und die damit veränderten Energiebedarfsverteilung für die Teilstrecken vor der LSA können den bisher vorliegenden Messdaten nicht entnommen werden. Deshalb werden für die Prognose des Zustands nach Umsetzung der Projektstufe 2 die Energiebedarfsverteilungen unverändert übernommen und nur jeweils die Übergangswahrscheinlichkeiten angepasst. Durch die qualitätsgerechte Bevorrechtigung an der LSA

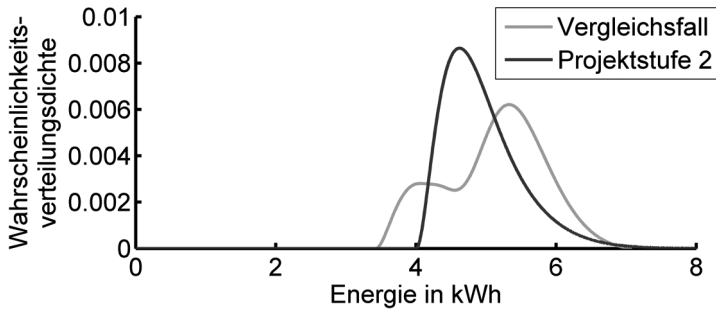


Abbildung 9: Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte für den Energiebedarf auf dem gesamten Untersuchungsabschnitt für Vergleichsfall und Projektstufe 2.

Reichenbachstraße ist für pünktliche und verspätete Bahnen verkehrstechnisch eine Halte-wahrscheinlichkeit von 0 % realisierbar. Weiterhin wird aufgrund der Wirksamkeit des FAS für die LSA Nürnberger Platz ebenfalls eine Haltewahrscheinlichkeit von 0 % angenommen.

In der Abbildung 9 ist für die Gesamtstrecke die Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte der Energie nach diesen Maßnahmen im Vergleich zum Fall ohne Umsetzung der Projektstufe 2 gezeigt.

In dieser Abbildung ist die deutlich höhere Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte bei kleineren Energiebedarfswerten zu erkennen. Betrachtet man wiederum nur die Mittelwerte, so ergibt sich zwischen den Haltestellen Reichenbachstraße und Nürnberger Platz eine Reduzierung des Energiebedarfs um durchschnittlich 4 % (0,2 kWh). Werktags werden auf diesem Streckenabschnitt damit rund 22 kWh durch landwärtige Fahrten der Linie 3 eingespart.

In den untersuchten Daten konnte der volle Funktionsumfang des FAS allerdings noch nicht abgebildet werden (z. B. vorausschauende Fahrweise mit Annäherungsgeschwindigkeiten unter 50 km/h und Ausrollphasen). Daher kann davon ausgegangen werden, dass der energetische Einspareffekt durch die vorgesehene Fahrerassistenz größer ausfällt. Entsprechende Untersuchungen werden gegenwärtig mit der Dresdner Messstraßenbahn durchgeführt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, wie zusätzliche, ungeplante Halte an LSA im Straßenbahnbetrieb mit einer qualitätsgerechten und kooperativen LSA-Steuerung sowie durch den Einsatz eines Fahrerassistenzsystems vermieden werden können.

Dazu wurden die energetischen Rahmenbedingungen benannt und die Methoden der energieoptimalen Fahrweise im Schienenverkehr durch Modifikation der Fahrregime umrissen. Zusätzlich sind die betrieblichen Rahmenbedingungen eines Straßenbahnbetriebs, in Form von kurzen Fahrzeiten und hoher Pünktlichkeit zu berücksichtigen.

Innerhalb dieser Rahmenbedingungen wurden verschiedene Ansätze zur Vermeidung zu-

sätzlicher Halte an Lichtsignalanlagen durch verschiedenartige ÖPNV-Bevorrechtigungen abgeleitet und gegenüber gestellt. Neuartig ist dabei der Ansatz durch eine qualitätsgerechte ÖPNV-Bevorrechtigung sowohl die Gesamtverkehrsqualität des Knotenpunktes als auch fahrgastrelevante Kriterien, wie die Pünktlichkeit des Straßenbahnfahrzeugs und Sicherung ungeplanter Anschlüsse, einzubeziehen. Weltweit erstmalig wird zusätzlich zur verbesserten LSA-Steuerung ein Fahrerassistenzsystem zur energiesparenden Fahrweise auf den Straßenbahnfahrzeugen eingesetzt. Dieses Assistenzsystem schöpft die gegebenenfalls entstehenden Behinderungszeiten an der LSA für die energieoptimale Fahrt als Fahrzeitreserve aus und vermeidet den Halt des Fahrzeugs vor der LSA.

Zur Evaluation der Energieeinsparung durch das Vermeiden des Zusatzhalts wurde im Beitrag ein neuartiges Verfahren basierend auf Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichten des Energiebedarfs und Semi-Markov-Prozessen bei der Abbildung von Fahrtbewegung und Zusatzhalten vorgestellt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Verbesserung der Verkehrssteuerung auf der Nord-Süd-Verbindung in der Landeshauptstadt Dresden“ wurden die vorgestellten Ansätze und Verfahren zur LSA-Steuerung und Fahrerassistenz pilotiert. Mittels erster Ergebnisse konnte die Wirksamkeit hinsichtlich Pünktlichkeit sowie Energiebedarfsreduzierung gezeigt werden. Eine Prognose auf den Endausbau des Systems im Untersuchungsabschnitt zeigt eine zu erwartende moderate Energieeinsparung. Im Zusammenhang mit den betrieblichen Randbedingungen und dem prioritären Ziel der Fahrplanstabilisierung ist das Ergebnis jedoch beachtlich.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird künftig die qualitätsgerechte ÖPNV-Bevorrechtigung schrittweise auf die Gesamtstrecke vom Nürnberger Platz bis zum Albertplatz ausgebaut. Das Fahrerassistenzsystem kommt ab März 2012 im Regelbetrieb auf 15 Fahrzeugen zum Einsatz.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt den Dresdner Verkehrsbetrieben, dem Straßen- und Tiefbauamt Dresden sowie dem Ingenieurbüro Schlothauer und Wauer als Projektpartner im Forschungsprojekt „Verbesserung der Verkehrssteuerung auf der Nord-Süd-Verbindung in der Landeshauptstadt Dresden“.

Literatur

- [Gas10] C. GASSEL und J. KRIMMLING: „Additional benefit of ITCS data used in road traffic control systems“. In: *General Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society*. WTCR Society (Veranst.) Lissabon, Portugal, 11.–14. Juli 2010, pages. ISBN: 978-989-96986-0-4.

- [Gav66] D. P. GAVER Jr.: „Observing stochastic processes and approximate transform inversion“. In: *Operation Research* 14.3 (1966), S. 444–459.
- [Hel71] B. HELLIGE: „Beitrag zur Untersuchung der Belastung von Energieversorgungsanlagen bei Straßenbahnen“. Dissertation A. Dresden: Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, 1971.
- [How95] P. G. HOWLETT und P. J. PUDNEY: *Energy-efficient train control*. Berlin: Springer, 1995. ISBN: 3-54019-990-X.
- [Kla08] S. KLAUSNER und M. LEHNERT: „Betriebsspezifische Auslegung von Energiespeichern für Straßenbahnen“. In: *Elektrische Bahnen* 106.5 (2008), S. 237–246.
- [Kli86] M. KLINGNER: „Mehrwertige Modelle zur Beschreibung der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit technischer Systeme“. In: *ZKI-Informationen* 3 (1986). Hrsg. von AKADEMIE DER WISSENSCHAFT DER DDR, ZENTRALINSTITUT FÜR KYBERNETIK UND INFORMATIONSPROZESSE.
- [Kli89] M. KLINGNER: „Methode zur Berechnung Semi-Markovscher Zuverlässigkeitsmodelle“. In: *Messen, Steuern, Regeln* 32.9 (1989), S. 397–401.
- [Kni82] J. H. KNIGHT und A. D. RAICHE: „Transient electromagnetic calculations using the Gaver-Stehfest inverse Laplace-Transform method“. In: *Geophysics* 47.1 (1982), S. 47–50.
- [Leh08] M. LEHNERT und S. KLAUSNER: „Auslegung mobiler Energiespeicher für Straßenbahnen“. In: *Symposium Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstung*. Innovationszentrum Bahntechnik Europa (Veranst.); VDE / ETG Fachbereich Bahnen und Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben (Veranst.) Dresden, 27.–28. Nov. 2008.
- [Leh11] M. LEHNERT: „Energieversorgung und Betrieb eines Nahverkehrssystems mit on-board-Speicher und Nachladepunkten“. Dissertation. Dresden: Technischen Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, 2011.
- [Liu03] R. LIU und I. M. GOLOVITCHER: „Energy-efficient operation of rail vehicles“. In: *Transportation Research Part A Policy and Practice* 37.10 (2003), S. 917–932.
- [Mat11] T. MATSCHEK, C. GASSEL und J. KRIMMLING: „Cooperative Traffic Lights under Consideration of the Needs of Public Transport and Motorised Individual Transport“. In: *8th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. ERTICO - ITS Europe (Veranst.) Lyon, France, 6.–9. Juni 2011, paper ID 0205.
- [Nol81] V. NOLLAU: *Semi-Markovsche Prozesse*. Frankfurt am Main: Thun, 1981. ISBN: 3-87144-567-3.
- [OSM12] *OpenStreetMap* - veröffentlicht unter CC-BY-SA 2.0. 2012.
- [Sta11] STATISTISCHES BUNDESAMT, Hrsg.: *Statistisches Jahrbuch 2011*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2011. ISBN: 978-3-8246-0912-3 und 978-3-8246-0913-0.

- [Ste70a] H. STEHFEST: „Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transform“. In: *Communication of the ACM* 13.1 (1970), S. 47–49.
- [Ste70b] H. STEHFEST: „Remark on algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms“. In: *Communication of the ACM* 13.10 (1970), S. 624.
- [Stö70] H. STÖRMER: *Semi-Markoff-Prozesse mit endlich vielen Zuständen*. Berlin: Springer, 1970.
- [VAM12] VAMOS-Verkehrsmanagementsystem der Stadt Dresden. 2012.

Korrespondierender Autor: Martin Lehnert, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Telefon: +49 351 463-42536, E-Mail: martin.lehnert@tu-dresden.de

The Traffic Management System VAMOS – from Research to Regular Operation

Andreas Kretschmer, Jürgen Krimmling

Technische Universität Dresden

The paper was published at the 19th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Vienna, Austria, October 22–26, 2012, paper ID EU-00421.

Abstract

With more than one million inhabitants and as the Saxon capital city Dresden is one of the most important metropolitan areas of this German federal state. It is located in the western part of Saxony, near to the borders to the Czech Republic and to Poland. Besides building measures especially the deployment of intelligent transport systems is required to ensure a capable, environmentally acceptable and energy-efficient mobility in the Dresden agglomeration. Within several projects funded by the German Federation and the Free State of Saxony (particularly “intermobil Region Dresden”) the Technische Universität Dresden, Institute for Traffic Telematics, has established the Traffic Management System VAMOS. Nowadays the complex system contains different task-specific control and processing subsystems. Key features of the VAMOS system are improved data acquisition (high-definition FCD), simulation based traffic modelling and the automated strategic overall coordination of the subsystems. In the last years the integration of data provided by the ITCS of the public transport company DVB AG was enhanced. Hence, the VAMOS system also supports multimodal traffic management decisions and traffic control measures taking into account the traffic conditions of both, public transport as well as individual traffic.

Keywords: Mobility Management, Traffic Management, High-definition FCD, HDFCD, Multimodality, Strategic Overall Coordination

1 Motivation

About 1.2 million inhabitants live in the Dresden agglomeration, whereof 500.000 live in the city itself and more than 700.000 in the region around the city. As the Saxon capital city Dresden is one of Saxony’s most important metropolitan and economic areas. Dresden is located near to the borders to Poland, especially to the border to the Czech Republic and within the Trans-European Corridor to the Baltic Sea. In the last years important parts of

the traffic infrastructure in and around Dresden have been finished. Traffic flow benefits from additional infrastructure but increases as well. Furthermore the number of inhabitants living in Dresden increased from year to year in the last decade and, according to current prognoses, will increase at least up to 2025. Additionally, traffic and transport managers have to deal with an increasing number of tourists visiting the City of Dresden.

Hence, several tasks for traffic and mobility management in the Dresden agglomeration have to be handled. Inner-city traffic and transport has to be kept capable and on a high level of quality – especially in times of large scale events. Moreover nationwide or border-crossing traffic should be flowing at all times and, if possible, should not affect urban areas. In case of large scale events in the City of Dresden a comprehensive traffic management is required, because regional traffic merges with nationwide and border-crossing traffic at least on the highways surrounding the Saxon capital city. Nevertheless, impacts on one of the highways would necessarily lead to congestions within the city area, if there were no suitable traffic management strategies.

2 Overview

Within several projects funded by the German Federation and the Free State of Saxony (i. a. “intermobil Region Dresden”) the Technische Universität Dresden (TUD), Institute of Traffic Telematics has established the Traffic Management System VAMOS for the western part of Dresden. Due to the decision of the city council of Dresden on April 10th 2003 it was afterwards gradually configured as the traffic management system for the whole City of Dresden.

Nowadays the system links different traffic control and process systems of the urban road system as well as of the highways. Basic functionalities like data acquisition, processing and fusion are completed by a strategic, fully automated overall coordination system. Furthermore, several subsystems are attached to use value-added real time traffic data for information providing and for the actuation of traffic management devices on the road side.

The VAMOS system is equipped with two control centres which are located at the city authorities, responsible for traffic infrastructure and management, and at the Technische Universität Dresden. The architecture of the “VAMOS Portal” module allows authorised operators and researchers to establish a virtual traffic management operation station at any place and at any time. This opportunity is used by the Technische Universität Dresden for testing of improved or newly developed components of the traffic management centre. As a result the VAMOS instance for the City of Dresden can be operated with very high availability and quality.

Figure 1 shows the architecture of the traffic management system VAMOS with its modules in regular operation (full line borders and arrows). Further modules are marked in grey with dashed line: They have passed field operational tests and are either currently in deployment (gray dashed border) or their data connection is currently migrated to a higher level (gray dashed arrows).

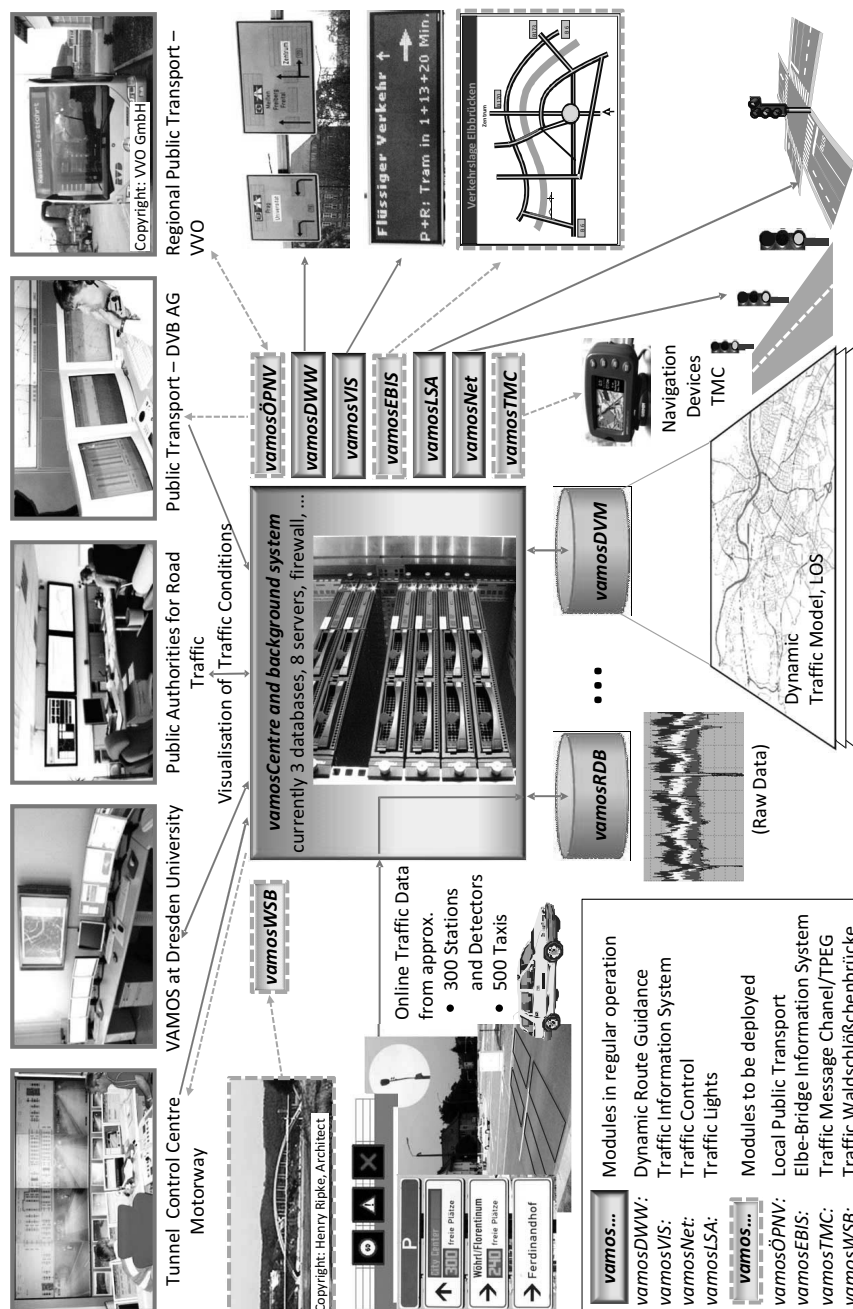


Figure 1: System architecture of the traffic management system VAMOS.

Nevertheless each of the operating modules may have its own road map regarding future development. By the help of abstract integration in a web-based user interface VAMOS ensures that obsolete instances of such modules (and partial the corresponding subsystems) can be operated until the migration to a replacement instance is completed (smooth migration).

If new devices shall provide additional features, first the web-based user interface would be extended. New features and functionalities can be activated via web-based configuration for the equipped devices and are therefore already available whilst migration (but of course not available for obsolete devices). The new device is put in operation via a new (data) interface and integrated into the extended user interface whilst existing devices are operated using the existing (data) interface. Step by step all of the devices concerned are adapted to the new (data) interface or simply replaced. The existing data interface is then put out of operation. For the whole phase of migration traffic management actors need to use only one user interface to control both of them, obsolete as well as replacement devices.

3 Basic principle and selected key features of the traffic management system VAMOS

3.1 Attached data sources and dynamic traffic model

As shown in figure 1 whilst establishment of the traffic system VAMOS several modules and subsystems have either been integrated or at least been connected to the core modules. There are three essential core modules which together serve as the backbone of VAMOS: Firstly, the raw database (*vamosRDB*) receives each kind of raw data gained by one of the connected subsystems. Secondly, the control of subsystems via VAMOS web-interface (*vamosPortal*) requires a complex rights management (*vamosCentre*). Finally, all the saved raw data has to be processed within the Dynamic Traffic Model (*vamosDVM*) combining data to one value for level of service (LOS) per road segment of the strategic road network.

If necessary, strategies are activated, wherefore several measures are accomplished by the help of the connected traffic control subsystems (route guidance *vamosDWW*, adaption of signal plans on single and connected traffic lights *vamosLSA* and *vamosNet*) as well as traffic information channels (Elbe-Bridge information system *vamosEBIS*, variable information displays *vamosVIS* and Traffic Message Channel via *vamosTMC*).

Figure 2 shows the distribution of the road-side detectors which are located within the Dresden agglomeration and attached to VAMOS. These are for instance induction loops, camera detectors, automatic traffic counting stations or additional infrared/radar detectors. 420 out of about 460 traffic lights belong to these data sources as well as guidance systems such as the parking guidance system of the city.

Positions and physical linkage (*fibre optics*) of important control centres are shown in figure 3. These centres are connected to VAMOS too and provide additional traffic and transport related data, e.g. from taxi companies (*Floating-Car-Data*, *FCD*), from ITCS of the



Figure 2: Detectors within the urban area of Dresden.

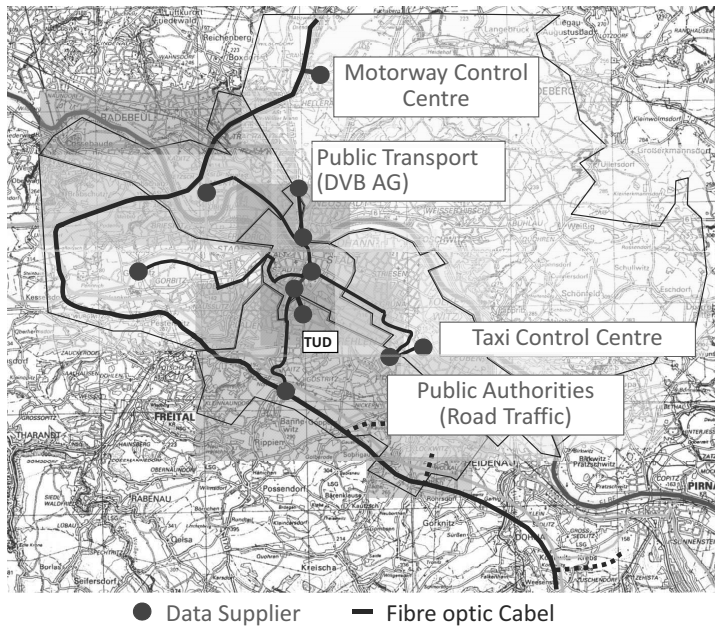


Figure 3: Control centers within the urban area of Dresden.

public transport companies such as the DVB AG (including *positions of Busses and Trams*) and from the control centre of the public authorities of the Free State of Saxony regarding the

motorways BAB 4 and BAB 17. Besides traffic data also operational conditions for tunnels (in particular on motorways) and corridor control systems are transmitted.

3.2 High-definition FCD

Besides conventional data sources that give access to parameters referring to fixed measuring cross-sections, floating car data allows considering parameters such as current velocity of vehicles referring to a point in time. The dynamic traffic model inquires these data sets in combination with conventional detectors and calculates the traffic conditions in real time.

Devices for enhanced data acquisition are in Dresden implemented in 500 taxi cars. Every five seconds each of the devices saves a new data set, so every minute twelve records per vehicle are sent to the VAMOS traffic data centre. Density of FCD (number of values per section) will increase, if vehicle velocity decreases (see figure 4). GPS-positions marked with a dot represent very low velocities and occur close to each other whereas hexagon marks show higher velocities and therefore have gaps between two consecutive positions.



Figure 4: Example data series of taxi-FCD including position and speed.

Recorded FCD contains timestamps, positions and velocity of the vehicles. Within the first step of data processing the numbers of stops, the lengths as well as the durations of congestions are considered – each in comparison to the distance covered. Based on these three parameters the level of service (six-stage LOS A to F) is being calculated within the Dynamic Traffic Model of VAMOS. Due to the high density of FCD in Dresden, parameters such as the number of stops per section can be estimated very exactly.

The combination of huge amounts of data gathered with common sensors and detectors, provided by dedicated control centres and recorded via high-definition FCD (*HDFCD*) covers the strategic road network of the Dresden agglomeration very well. This also includes all sections suspicious to congestions and leads to a high quality of traffic information.

3.3 Strategic overall coordination

The VAMOS core system serves for a conflict-free management of several internal and external subsystems (e.g. traffic light controllers and coordination, parking management and guidance systems, dynamic route guidance system and first of all traffic information components). This automated monitoring takes into account subsystems operated by different authorities, for instance for federal roads within the urban area of Dresden or the highways in the surroundings of the Saxon capital city.

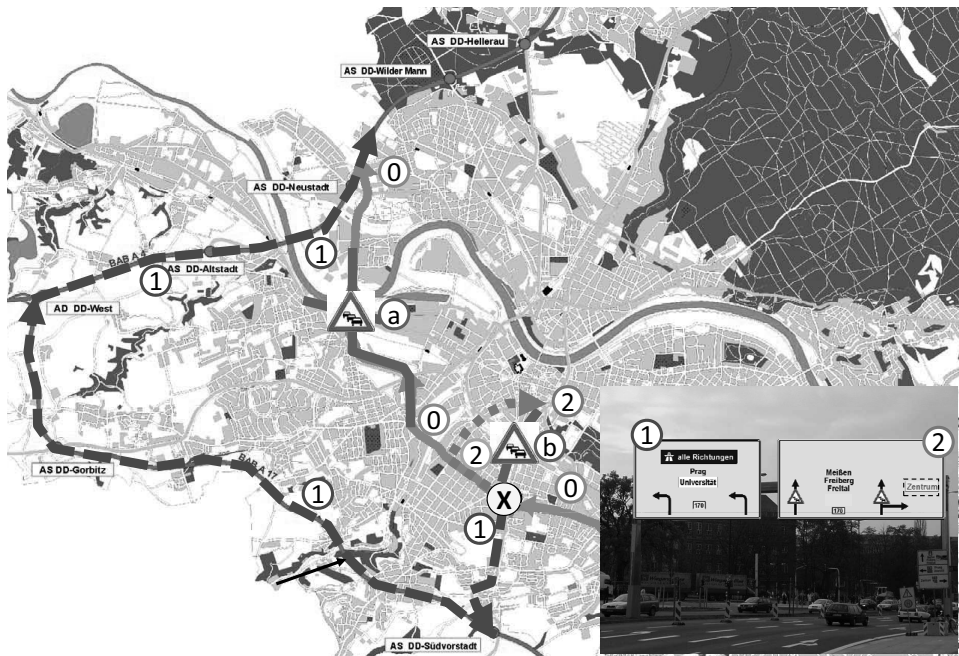


Figure 5: Example of overlapping congestions managed using pre-defined strategies.

Figure 5 shows an example for traffic management strategies in case of overlapping disruptions. Initial state (0) of the route guidance system was passing the marked intersection (x) straight ahead (full line marked route for the destination Berlin via motorway). Based on traffic conditions calculated by the Dynamic Traffic Model congestions on the following sections (a) of this route are detected. The state of the guidance system is changed to reach the motorway via turning to the left (“motorway – all directions”, dashed line marked route), blanking the motorway advice and activating the congestion warning for the straight-on direction of the guidance sign (1). If there is an additional congestion in direction to the centre of the city (b), first part the former route to the motorway might be recommend as an alternative to the centre (dotted line marked route). For this purpose the advice “Zentrum” is blanked for turning right (2) and the next guidance sign leads traffic participants on the dotted line marked route.

3.4 Multimodal traffic management

In the last years the TUD's approach for energy-efficient operation of public transport vehicles was extended from an autonomous to a cooperative system. For this purpose VAMOS was extended by two modules to connect the management system for private road traffic with the ITCS of the public transport company DVBAG. Access to data of traffic light controllers is now possible in real time and is used to either optimise driving regimes (minimising the number of stops) or at least to reduce waiting times for public transport at intersections. Such regulation measurements are activated fully automated if there is enough capacity according to traffic conditions in private road traffic as well as in public transport [Mat11; Gas12].



Figure 6: Multimodal view on traffic conditions in Dresden agglomeration.

Furthermore, knowing the positions of trams and busses exactly, advice on Park-and-Ride stations (P+R) via variable information displays is provided. Information on departing trams is given all the time, additionally information about traffic conditions in private motorised traffic can be given, for instance in case of crucial disruptions caused by large-scale events.

Figure 6 shows an extract of the VAMOS map of Dresden including road segments for LOS and real time positions of taxis, trams and busses. The Variable Information Display (controlled by *vamosVIS*) shows the default state for flowing traffic with advice on P+R station nearby the route to the centre.

Variable Information Displays as shown in figure 6 are managed via the web-based VAMOS user interface (*vamosPortal*). Figure 7 shows the user interface for the module *vamosVIS*. As the content of the displays depends on several input sources, the user interface gives an overview over the control logic of the fully automated background service. The dark marked arrows show current active components beginning from the highest priority to the lowest one.

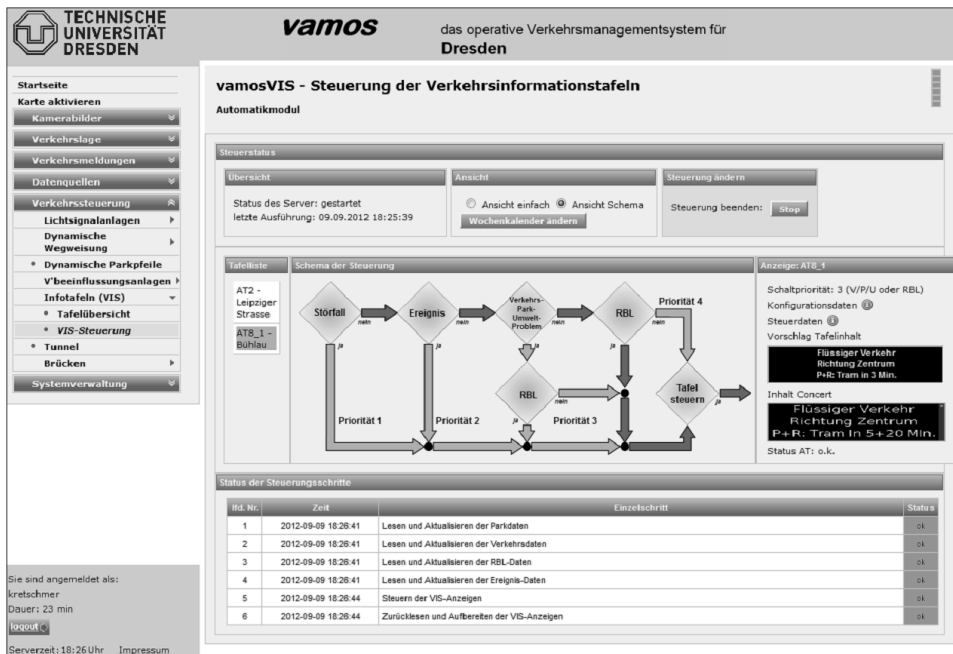


Figure 7: Example for a comprehensive VAMOS service regarding traffic and transport management.

First the incident detection is checked, then event calendar containing data regarding large-scale events, roadwork and closed links. Afterwards environmental and parking situation as well as automatically calculated traffic conditions on concerned routes is approved. Finally the ITCS of the public transport gives input to be shown on the display.

If one of the input sources with higher priority required a pre-defined measure, the logical path would be changed and, for instance, specific alert messages would be sent to the display. The example given in figure 7 shows flowing traffic but nevertheless gives advice on public transport departing from the P+R station nearby.

The user interface provides information about the display's state within the last minutes, allows to start or stop the automatic service and to send override messages (free text). Furthermore a visualisation service shows all variable message signs at a glance. Detailed views allow operators to get an overview over data processed in the background immediately – regardless which mode of transport it is.

4 Conclusion

By the help of researchers and public authorities VAMOS developed from a basic control system for individual traffic to a complex, multimodal and responsibilities combining traffic

and mobility management system. According to the completion of new infrastructure in and around Dresden, such as the new bridge across the river Elbe (“Waldschlösschenbrücke”), and caused by requirements for additional functionality, VAMOS will be expanded in spatial meanings and extended with new subsystems in the next years.

Acknowledgements

The research and development project “intermobil Region Dresden” was funded by the Ministry of Education and Research (BMBF), grant number 19B9907A8, and the demonstration and the implementation were supported by the Free State of Saxony.

Afterwards the transfer of certain demonstrated functionalities into regular operation was funded by the Free State of Saxony. Nowadays the further development and expansion is supported by the European Union (European Regional Development Fund).

Special thanks go to the city authorities of Dresden who are the main operators for traffic management in the Saxon Capital City and therefore give immediately feedback on all newly developed functionalities, algorithms and user interfaces to the researchers at the Technische Universität Dresden. Furthermore we thank for the established cooperation with the DVB AG as the public transport company of Dresden and the public authorities of the Free State of Saxony responsible for the highways in Saxony.

References

- [Eur08] EUROPEAN COMMISSION, ed.: *Action Plan for the Deployment of Intelligent Transport Systems in Europe*. COM (2008) 886. Brussels, Belgium, 2008.
- [Eur10] EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL, ed.: *Directive 2010/40/EU on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport*. Directive 2010/40/EU. Brussels, Belgium, 2010.
- [Gas10] C. GASSEL and J. KRIMMLING: “Additional benefit of ITCS data used in road traffic control systems”. In: *General Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society*. Lisbon, Portugal, July 11–15, 2010, pages. ISBN: 978-989-96986-0-4.
- [Gas12] C. GASSEL and T. MATSCHEK: “Cooperative traffic signals for energy efficient driving in tramway systems”. In: *19th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Vienna, Austria, Oct. 22–26, 2012, paper ID EU-00422.
- [Kor09] M. KÖRNER: “Traffic conditions determination based on floating car data with short capturing intervals”. In: *16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Ed. by ERTICO. Stockholm, Sweden, Sept. 21–25, 2009, paper ID 2991.

- [Kor11] M. KÖRNER: “New detection technology, systems integration and fully automated operation – the keys to effective and efficient road traffic management”. In: *2nd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*. Leuven, Belgium, June 22–24, 2011, paper ID 008. URL: <http://www.mech.kuleuven.be/MT-ITS2011/download/proceedings.html>.
- [Kor12a] M. KÖRNER: “Determination of turning rates using Floating Car Data”. In: *19th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Vienna, Austria, Oct. 22–26, 2012, paper ID EU-01003.
- [Kor12b] M. KÖRNER and R. ENGELMANN: “3x benefit by local competence - direct use of Taxi-FCD to generate road traffic messages”. In: *19th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Vienna, Austria, Oct. 22–26, 2012, paper ID EU-00015.
- [Mat11] T. MATSCHEK, C. GASSEL, and J. KRIMMLING: “Cooperative Traffic Lights under Consideration of the Needs of Public Transport and Motorised Individual Transport”. In: *8th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. Lyon, France, June 6–9, 2011, paper ID 0205.

Corresponding author: Andreas Kretschmer, Technische Universität Dresden, Faculty of Transportation and Traffic Sciences “Friedrich List”, phone: +49 351 463-36826, e-mail: a.kretschmer@tu-dresden.de

Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung

Leiter der Professur

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling

Telefon: +49 351 463-39750

E-Mail: Juergen.Krimmling@tu-dresden.de

Sekretariat:

Martina Zahr

Telefon: +49 351 463-36784

Telefax: +49 351 463-36785

E-Mail: Martina.Zahr@tu-dresden.de

Hausanschrift:

Andreas-Schubert-Str. 23

01069 Dresden

A-Gebäude

Raum A-116

Postanschrift:

TU Dresden

Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Verkehrstelematik

01062 Dresden

In der nachfolgenden Tabellen sind in der Spalte „Telefon“ nur die Apparatnummern der Mitarbeiter aufgeführt. Die Einwahl in das Netz der TU Dresden lautet +49 351 463 - und ist der Apparatnummer voranzustellen.

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Name	Telefon	E-Mail
Dr.-Ing. Thomas Albrecht	36765	Thomas.K.Albrecht@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Anne Binder	36764	Anne.Binder@tu-dresden.de
Dr.-Ing. habil. Klaus-Peter Döge	36779	KlausPeter.Doege@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Ralf Engelmann	36768	Ralf.Engelmann@tu-dresden.de
Dr.-Ing. Ralf Franke	36754	Ralf.Franke@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Dipl.-Swt. Sven Fröhlich	36718	Sven.Froehlich@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Christian Gassel	36749	Christian.Gassel@tu-dresden.de
Birgit Jaekel	36786	Birgit.Jaekel@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Andreas Kretschmer	36826	A.Kretschmer@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Matthias Körner	36768	Matthias.Koerner@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Mario Krumnow	36780	Mario.Krumnow@tu-dresden.de
Dr.-Ing. Martin Lehnert	42536	Martin.Lehnert@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Tobias Matschek	36723	Tobias.Matschek@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Renatus Matuschowitz	36773	Renatus.Matuschowitz@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Sebastian Pape	36812	Sebastian.Pape@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Gunter Thiele	36766	Gunter.Thiele@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Frank Thonig	42535	Frank.Thonig@tu-dresden.de

Technische Mitarbeiter

Name	Telefon	E-Mail
Lutz Buschmann	36747	Lutz.Buschmann@tu-dresden.de
Henning Jeske	36778	Henning.Jeske@tu-dresden.de

